



***Facultad
de
Ciencias***

**IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE
FLUCTUACIONES EN EL INTERCAMBIO
GASEOSO DE LA CUEVA DE ALTAMIRA
CON LA ATMÓSFERA EXTERIOR**
(Identification and analysis of the fluctuations
in the gas exchange of Altamira Cave with the
outer atmosphere)

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN FÍSICA

Autor: Julia Fábrega Torrano

Director: Carlos Sáinz Fernández

Co-Director: Daniel Rábago Gómez

Junio - 2021

Índice

Agradecimientos	3
Resumen	4
1. Introducción	5
1.1. La cueva de Altamira	5
1.2. Cronología del estudio de la cueva	5
1.3. Dinámica atmosférica general de la cueva	7
2. Objetivos	8
3. Materiales y métodos	8
3.1. Instrumentación	8
3.1.1. Medida de la concentración de radón	8
3.1.2. Medida de la concentración de CO ₂ y de la temperatura	8
3.2. Series temporales de parámetros ambientales	9
3.3. Criterios de identificación de eventos de desgasificación y recarga	12
3.4. Correlaciones	13
4. Resultados y discusión	15
4.1. Inventario de eventos	15
4.2. Correlaciones	20
5. Conclusiones	37

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis tutores, en especial a Carlos, que ha confiado en mí para llevar a cabo este trabajo y ha estado siempre disponible cuando lo he necesitado. Además, agradecer también que me ha permitido entrar a la cueva de Altamira. Ha sido una experiencia inolvidable y me ha permitido ver en primera persona el arte rupestre y el trabajo que realiza el equipo encargado del seguimiento ambiental.

En segundo lugar, agradecer a mi familia, a mi novio y a mis amigos por haberme acompañado y apoyado durante cuatro años de carrera, especialmente en esta última etapa.

Resumen

En este trabajo se han estudiado los factores que provocan la ventilación de la Sala de Polícromos de la cueva de Altamira durante periodos cortos de tiempo por su posible impacto en el transporte de materia desde el exterior que pudiera influir en las condiciones de conservación del arte rupestre contenido en esta sala. Para ello, se ha realizado un inventario de eventos en los que ocurren grandes desgasificaciones durante varios días en el periodo 2015-2020. La mayoría de estos episodios de desgasificación y recarga ocurre durante la primavera y el otoño. Esto quiere decir que la sala se ventila considerablemente durante estos periodos cortos de tiempo.

Además, se ha comprobado la hipótesis de que la temperatura es uno de los factores principales que provoca las desgasificaciones de periodo corto, como ya se conoce que ocurre en las desgasificaciones anuales. Para este fin, se han realizado correlaciones entre diversos parámetros como la concentración de gases trazadores (CO_2 y ^{222}Rn) y los gradientes de densidad y de temperatura entre la atmósfera exterior y el interior de la Sala de Polícromos.

Palabras clave: Cueva; Ventilación; Gases trazadores; Temperatura; Desfases temporales.

Abstract

We have studied the factors that cause the ventilation of the Polychromes Room of Altamira Cave for short periods of time due to its possible impact on the transport of matter from the outside that could influence the conservation conditions of the rock art contained in this room. To this end, an inventory of events has been carried out in which large degassing occurs during several days during the 2015-2020 period. The most of the outgassing-recharge events occurs especially during the spring and autumn. This means that the room is significantly ventilated during these short periods of time.

In addition, the hypothesis that the temperature gradient between the indoor and outdoor atmosphere is one of the main factors that causes short-period degassing has been proven. It is already known that it occurs in annual degassing. To this end, correlation analysis between various parameters such as the concentration of tracer gases (CO_2 and ^{222}Rn) and the gradients of density and temperature between the outer atmosphere and the interior of the Polychrome Room have been made.

Keywords: Cave; Ventilation; Tracer gases; Temperature; Time lags.

1. Introducción

1.1. La cueva de Altamira

Altamira es una cueva muy importante debido al arte rupestre paleolítico que conserva en su interior. Además, es una de las cuevas que albergan las mayores colecciones de arte rupestre en Europa. La mayoría de las pinturas de de la cueva se encuentran en la Sala de Polícromos.

Altamira está situada en Santillana del Mar, Cantabria. Tiene una longitud aproximada de 270 m y su entrada, que está orientada hacia el norte, se encuentra a una altura de 152 m sobre el nivel del mar. En la Figura 1 se muestra un plano de Altamira superpuesto a una ortofoto del terreno bajo el que se encuentra la cueva. La profundidad de los techos respecto al nivel de la entrada no son muy grandes, como se indica en la figura. Por lo tanto, se puede decir que Altamira es una cueva superficial. También tiene una configuración kárstica que hace que sea un sistema dinámico y complejo donde intervienen varios factores como el terreno sobre la cueva, las rocas o los fenómenos atmosféricos externos. Procesos como la ventilación y el intercambio de gases son unos de los factores más relevantes que provocan el intercambio de materia y energía que ocurre entre la cueva y el exterior, influyendo en la conservación de las pinturas que se encuentran en el interior de la cueva.

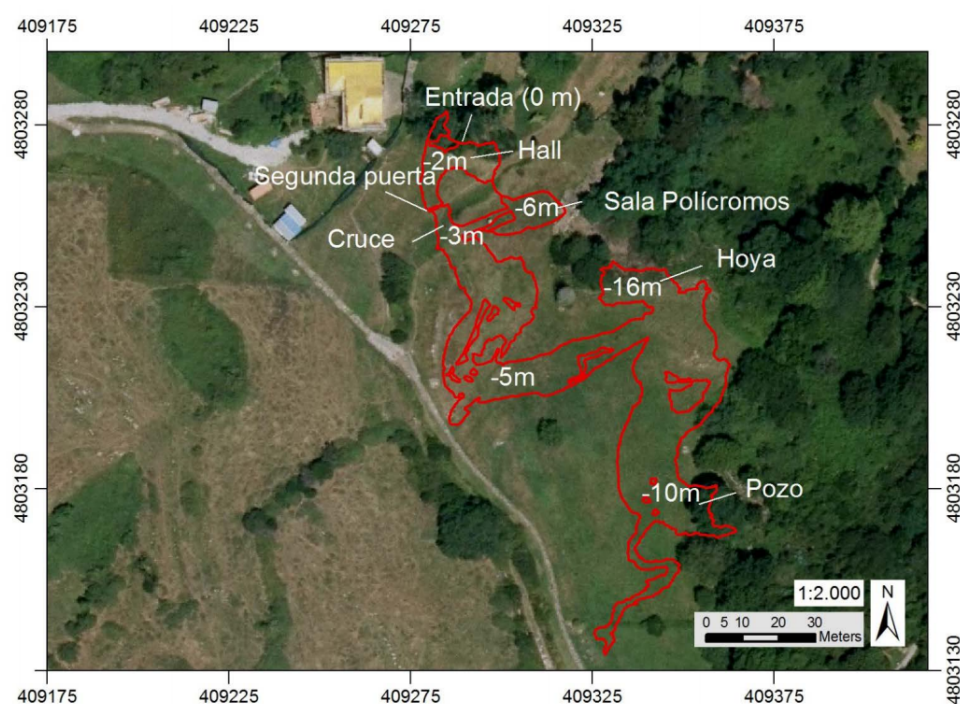


Figura 1: Plano de la cueva de Altamira (limitado en rojo) superpuesto a una ortofoto. Se indica cuál es cada sala y la profundidad del techo de cada zona respecto de la entrada (en blanco). En los bordes se indican las coordenadas de georreferenciación en el sistema ETRS89.

1.2. Cronología del estudio de la cueva

Como ya se ha comentado, el sistema kárstico es complejo y depende de muchos factores, por lo que hay que estudiarlos para comprender su funcionamiento y llevar a cabo, en la medida de lo posible, las acciones necesarias para conservar las pinturas. Para conocer aquellos factores que influyen en la conservación del arte rupestre en la cueva, es necesario el estudio y seguimiento de las condiciones ambientales y de los procesos físicos que ocurren en ellas mediante la acumulación de series temporales que permita establecer unas condiciones que sirvan de referencia en base a esas series históricas.

Desde su descubrimiento en 1868, Altamira ha recibido un gran número de visitas. Hasta 1977 visitaban anualmente la cueva unas 177000 personas, pero ese año la cueva se cerró al público porque se observó una decoloración de las pinturas que consistía en velos de calcita que se habían formado sobre la figura de la cierva.

En 1979 fue la primera vez en la que se tomaron medidas continuas de parámetros ambientales. Se midieron y estudiaron variables como la temperatura [9], la humedad relativa, y las concentraciones de CO₂ y de radón [10], además de la

influencia antrópica sobre los mismos. Estas mediciones permitieron al profesor Eugenio Villar de la Universidad de Cantabria llevar a cabo una investigación con el fin de describir la cueva en ausencia de seres humanos y establecer un régimen de visitas para determinar cómo afectaba la presencia de personas al medio ambiente de la cueva [8]. El régimen de visitas limitó un acceso máximo de 11320 personas al año y tenía la finalidad de que las variaciones de los parámetros ambientales provocados por la presencia humana no fuesen acumulativos, es decir, que se recuperasen los niveles naturales entre visitas. El régimen de visitas se mantuvo hasta el 2002 porque se observaron unas manchas verdes de microorganismos en el techo de la Sala de Polícromos.

Entre febrero de 1997 y enero de 1998 se reanudaron las medidas continuas de parámetros ambientales para un proyecto que estudiaba el deterioro de arte rupestre prehistórico en cuevas kársticas provocado por las visitas en masa dirigido por Manuel Hoyos, miembro del CSIC. En este proyecto se sacaron las siguientes conclusiones: la delimitación de un área de protección total de la cueva (APT), la identificación de materia orgánica en el agua y el efecto que provocaba y la verificación de la existencia de poblaciones microbiológicas en el techo y las paredes. El estudio caracterizó el impacto del régimen de visitas de Villar a la Sala de Polícromos y se vio que los valores de algunas variables estudiadas no se recuperaban entre ciclo y ciclo. Esto puso de manifiesto que había que redefinir el régimen de visitas porque el deterioro de la cueva continuaba desde su imposición [2].

En 2002 se detectaron puntos verdes cercanos a la cierva y a un bisonte. Se trataba de microorganismos fotótrofos que aparecieron como consecuencia de la iluminación eléctrica que había sido instalada. Esta generaba autoencendidos que se producían fuera del tiempo de visitas. Por esta razón se desinstaló el sistema de iluminación. Ese mismo año también se cerró la cueva a visitas públicas para estudiar las zonas verdes.

En el periodo entre 2003 y 2012 el CSIC se encargó del estudio de la cueva. Entre 2003 y 2005 el CSIC llevó a cabo *El análisis de las condiciones de conservación de la cueva y de su arte paleolítico*. Respecto a la caracterización microambiental se confirmó que la cueva presentaba menos oscilaciones en los principales parámetros ambientales como consecuencia del cierre de la cueva en 2002. Esto implicaba que el sistema fuera más estable y se aproximase al estado de equilibrio bajo condiciones ambientales. Se llevó a cabo un experimento con una visita de 6 personas en la que se constataba que tras 5 minutos de permanencia del grupo, el paso de vapor de agua a líquido se hacía efectivo y podría comenzar la condensación en los techos. Se señaló la necesidad de llevar a cabo un estudio más detallado acerca de los tiempos de recuperación de las variables y el efecto acumulativo. Respecto a las poblaciones microbiológicas se confirmó la existencia de microorganismos fotosintéticos además de hongos y bacterias anaerobias en Polícromos. Se concluyó que los problemas fundamentales para la conservación de la cueva están relacionados con las perturbaciones microambientales provocados por la actividad antrópica que originan procesos de corrosión y colonización bacteriana. Se plantearon recomendaciones como realizar un control continuo de las comunidades microbianas y, en caso de permitir visitas, se recomendó realizar un periodo de prueba mínimo de un ciclo anual muy controlado (grupo diario de 6 personas durante 10 minutos como máximo) para observar los cambios producidos en el microambiente. Además se planteó la instalación de un doble cierre, es decir, dos puertas, para reducir el intercambio de partículas y energía con la zona del Hall [2].

Entre 2007 y 2009 el CSIC llevó a cabo el *Estudio integral del estado de conservación de la cueva de Altamira y su arte paleolítico*. El objetivo era encontrar las perturbaciones medioambientales que provocaban el deterioro y la aparición de microorganismos. En cuanto a la geología y la cobertera edáfica exterior se comprobó el papel que tiene la humedad del suelo en los procesos de ventilación de la cueva. Para valores de humedad relativa del aire exterior mayores al 75 % se inician los procesos de absorción que inician el rellenado de poros de las rocas que rodean la cueva y si superan el 85 % puede llegar a cerrar todo el sistema, observándose los mayores niveles de CO_2 y ^{222}Rn en invierno. Respecto al control geoquímico del agua de infiltración se observó una disminución progresiva de los niveles de nitratos en el agua debido a que se controlaba el desarrollo de la cobertera vegetal en el área de infiltración directa. En lo tocante al análisis macroambiental se monitorizaron parámetros microambientales durante dos ciclos anuales (2007-2008, 2008-2009) que revelaban que la temperatura media en la Sala de Polícromos había disminuido respecto al mismo periodo en 2004-2005. En 2008 se cerró de forma permanente la segunda puerta y se concluyó que la amplitud de las oscilaciones de periodo corto de CO_2 y ^{222}Rn , propias del periodo febrero-abril, se redujeron considerablemente como consecuencia de esta barrera para detener el intercambio de materia (ventilación) con el exterior. También se concluyó que los visitantes suponen un aporte de materia y energía que produce cambios en las condiciones físico-químicas naturales. Concretamente aumentan la oscilación termohigrométrica y la concentración de CO_2 , además de la emisión de vapor de agua por parte de los visitantes que provoca la condensación de agua en el techo. Por último, la colonización de microorganismos era muy palpable en la entrada y disminuía hacia el interior aunque alcanza a todas las salas. Se rechazó su eliminación con biocida porque no se conocía el efecto que provocaría. La estrategia que se planteó fue continuar en la misma línea, manteniendo las menores tasas posibles de conexión con el exterior [7] [2].

Entre 2010 y 2012 el CSIC llevó a cabo mediciones continuas y el mantenimiento del sistema de control medioambiental en la entrada, el pasillo y la Sala Polícromos [2].

Entre 2012 y 2014 se llevó a cabo el *Programa de investigación para la conservación preventiva y el régimen de acceso a la cueva de Altamira* en el que intervinieron diversas instituciones, entre las que se encontraba la Universidad de Cantabria. El objetivo del programa era la evaluación de la dinámica natural actual de la cueva, el impacto antropogénico en la conservación de la cueva y sus pinturas y el diseño de medidas de conservación preventiva.

Este programa supuso un cambio en la filosofía del estudio de la cueva. Se establecieron protocolos para todos los estudios de Altamira y se redefinieron los límites de acceso, no vinculados al deterioro, sino basados en series históricas. Esto quiere decir que al tener el conjunto de series históricas sobre diversos parámetros se pueden calcular los valores promedios y su desviación estándar y que si se sobrepasa de ese rango, no quiere decir que esté directamente relacionado con el deterioro de la cueva. Entonces, lo que se hace es llevar a cabo un seguimiento para saber cuales son las condiciones de la cueva [3]. En 2014 se volvió a abrir la cueva al público con un régimen de visitas experimentales definido en el programa de investigación. Las visitas eran de 5 personas más 2 guías semanales donde se controlaban las variaciones de CO₂, temperatura y humedad [3].

En 2014 se implantó el Plan de Conservación Preventiva y continúa en la actualidad. Dentro de este marco, la Universidad de Cantabria es responsable del seguimiento ambiental y control del biodeterioro mediante sucesivos contratos con el Ministerio de Cultura. Para el seguimiento ambiental se utilizan seis estaciones, una en el exterior y cinco en el interior de la cueva. Estas estaciones miden temperaturas a diferentes alturas, presión atmosférica, humedad relativa y CO₂ a media altura. Cada dos semanas el equipo de la UC entra en la cueva para tomar medidas instantáneas como la concentración de partículas y de CO₂ y sustituir aparatos de medida como los detectores de radón. En la Sala de Polícromos se recogen muestras de agua en distintos puntos de goteo y se mide el pH in situ de algunas muestras, además de los TDS (Sólidos Totales Disueltos), cationes y aniones que se miden en el laboratorio [5].

1.3. Dinámica atmosférica general de la cueva

El trabajo se ha centrado en el estudio del intercambio de aire que realiza la cueva con el exterior. Es importante estudiar esta dinámica porque la entrada y salida de aire influye en la conservación de las pinturas debido a que puede afectar a las condiciones internas de la cueva e incluso promover el transporte de materia orgánica.

En anteriores trabajos se han utilizado el radón y el CO₂ como gases trazadores para estudiar el intercambio gaseoso de la cueva con el exterior. La concentración de estos gases indica el aislamiento o ventilación de la cueva. La producción de radón dentro de Altamira se puede considerar constante ya que no hay procesos que alteren la composición del isótopo de ²²⁶Ra del que proviene. En cambio, el aporte de CO₂ a la cueva no puede considerarse constante. Este gas proviene de la cobertura vegetal y no se produce siempre la misma cantidad. Este gas es arrastrado por el agua durante el proceso de karstificación. Este proceso consiste en la filtración del agua a través de las rocas que rodean la cueva. Este agua se acidifica con el aporte de CO₂ de origen vegetal y provoca la disolución de las rocas, generando así las grietas que conforman la configuración kárstica propia de la cueva de Altamira. En el seguimiento histórico de la composición química del agua se ha observado que tiene un carácter incrustante, aunque el seguimiento continuo es esencial para detectar cambios en dicho carácter que pudieran afectar a la conservación de las pinturas. El agua que llega al techo de la cueva se encuentra saturada de minerales, por lo que no es capaz de disolver la roca del techo y por lo tanto, no se llegan a borrar las pinturas, es decir, este agua actúa como una capa protectora. Por lo tanto, una parte del CO₂ que llega a la cueva depende de cuánto se haya disuelto en el agua y de cuánto agua llega a la cueva a través de las rocas. Además, también puede llegar en forma gaseosa a través de los poros y grietas de las rocas que rodean la cueva, aunque esta contribución es despreciable frente al aporte a través del agua [1].

La temperatura de la cueva depende de la temperatura que hay en la atmósfera exterior. La onda térmica se propaga a través de la roca, disminuyendo su amplitud y provocando un desfase entre la onda térmica del exterior y la del interior de la cueva. Cada serie temporal de temperaturas del interior de las salas tiene un desfase respecto a la serie temporal del exterior y una amplitud distinta que dependen del espesor de roca que hay en el techo de cada una. El desfase para la temperatura del Hall es de 1 mes y para la Sala de Polícromos es de 4 meses debido a que el espesor de roca en el techo de esta sala es de 7-8 m. El promedio de la variación anual de las temperaturas medias mensuales en Polícromos está en el rango de 1.3-1.4 °C y en el Hall es de 3.7 °C teniendo en cuenta los datos entre 2014 y 2018. En Polícromos la variación anual es menor que en el Hall debido al mayor grado de aislamiento [5].

2. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo estudiar los factores que provocan la ventilación Sala de Polícromos durante periodos cortos de tiempo por su posible impacto en el transporte de materia desde el exterior que pudiera influir en las condiciones de conservación del arte rupestre contenido en esta sala. Para ello, hay que realizar un inventario de eventos en los que ocurren grandes desgasificaciones en varios días en el periodo 2015-2020. La mayoría de estos procesos de desgasificación y recarga ocurren durante la primavera y el otoño. Esto quiere decir que la cueva se ventila considerablemente durante estos periodos cortos de tiempo.

Se parte de la hipótesis de que la temperatura es uno de los factores principales que causa las desgasificaciones de periodo corto que ocurren en la cueva de Altamira, como ya se conoce que ocurre en las desgasificaciones anuales. Para comprobar esta hipótesis se realizarán correlaciones entre variables como los gradientes de temperatura y densidad entre la atmósfera exterior y la Sala de Polícromos y las concentraciones de los gases trazadores (CO_2 y ^{222}Rn).

3. Materiales y métodos

3.1. Instrumentación

3.1.1. Medida de la concentración de radón

La concentración de radón se ha medido cada hora con unos detectores llamados Radon Scout. Estos cuentan con un detector de silicio que convierte la energía producida en las emisiones alfa del radón y su progenitor en impulsos eléctricos cuya magnitud es proporcional a la energía absorbida, es decir, se mide la concentración de radón por espectrometría alfa. Estos dispositivos, que se sustituyen cada 15 días, cuentan con una memoria donde se almacenan los datos para posteriormente ser descargados. Todos los detectores Scout se calibran en el LaRUC cada seis meses.

La cueva de Altamira presenta regularmente una elevada humedad relativa que puede generar problemas en la medición. Por ejemplo, puede cambiar la eficiencia del aparato o causar daños en los sistemas electrónicos. Para reducir al máximo estos problemas, los detectores se meten en una bolsa de plástico de baja densidad que es impermeable al agua pero permite el paso del radón por difusión [6].

Se utilizan otros detectores que aportan un doble control en las medidas. Estos son los detectores de trazas CR-39 que miden la concentración de forma integrada, es decir, miden la concentración media en el periodo de tiempo de medida. Las partículas alfa que emiten el radón y sus descendientes dejan trazas en el detector. Las medidas se obtienen posteriormente con un revelado químico que descubre las trazas y con un conteo automático de la densidad de las trazas que se lleva a cabo con microscopio óptico. El LaRUC está acreditado según la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005 para llevar a cabo medidas de radón con estos detectores y está acreditado por ENAC. Los dos dispositivos de medida de radón se pueden observar en la Figura 2.



Figura 2: A la izquierda un detector de traza CR-39 y a la derecha un detector Radon Scout dentro de una bolsa de plástico, en la cueva de Altamira.

3.1.2. Medida de la concentración de CO_2 y de la temperatura

Las mediciones de CO_2 y de temperatura se llevan a cabo con unas estaciones de medida localizadas en las salas y en el exterior. En la Figura 3 se muestra una estación de medida dentro de una Sala de la cueva. Las variables son medidas cada

minuto y diariamente se descargan los datos obtenidos.

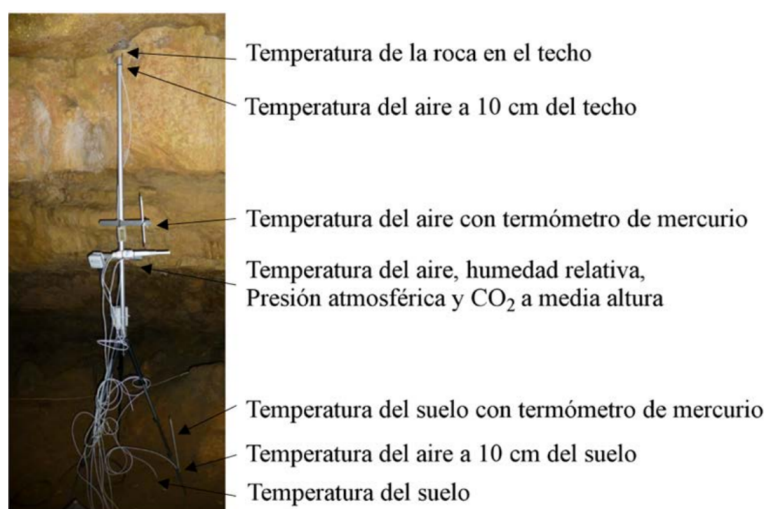


Figura 3: Una estación de medida en el Hall. Se señalan los dispositivos que miden temperaturas a diferentes alturas y la humedad relativa, la presión y el CO_2 a media altura.

3.2. Series temporales de parámetros ambientales

La base de datos que se ha proporcionado cuenta con una serie de medidas experimentales de parámetros ambientales de la Sala de Polícromos y el exterior de la cueva tomados desde el 1 de enero de 2015 hasta el 31 de diciembre de 2020. Esta base de datos se ha proporcionado en Excel y se ha importado a Matlab donde cada variable se ha introducido en un vector y se han realizado todas las operaciones necesarias necesarias. Los parámetros proporcionados son los siguientes:

- Concentración de Radón en la Sala de Polícromos (C_{Rn}): medida cada hora en Bq/m^3 .
- Concentración de CO_2 en la Sala de Polícromos (C_{CO_2}): medida cada minuto en ppm. Las medidas proporcionadas están agrupadas cada 15 minutos.
- Temperatura a media altura en la Sala de Polícromos (T_{poli}): medida cada hora en $^{\circ}\text{C}$.
- Temperatura a media altura en el exterior de la cueva (T_{ext}): medida cada hora en $^{\circ}\text{C}$.
- Presión en la Sala de Polícromos (P_{poli}): medida cada minuto en hPa. Las medidas proporcionadas están agrupadas cada 15 minutos.
- Presión en el exterior de la cueva (P_{ext}): medida cada minuto en hPa. Las medidas proporcionadas están agrupadas cada 15 minutos.
- Humedad relativa en la Sala de Polícromos (HR_{poli}): medida cada minuto en %. Las medidas proporcionadas están agrupadas cada 15 minutos.
- Humedad relativa en el exterior de la cueva (HR_{ext}): medida cada minuto en %. Las medidas proporcionadas están agrupadas cada 15 minutos.

En la Figura 4 se muestran las temperaturas para la Sala de Polícromos, el Hall y el exterior de la cueva desde 2015 hasta 2020. Se pueden apreciar las distintas amplitudes y el desfase de las series temporales.

El gradiente de temperatura entre el exterior y cada sala oscila a lo largo de los años como se puede ver en la Figura 5. Presenta los máximos y mínimos prácticamente al mismo tiempo que la serie de temperaturas del exterior. Esto se debe a que la serie temporal de la temperatura del exterior tiene una mayor amplitud que las series de las cuevas. En las figuras 6 y 7 se muestran los gradientes de temperatura entre las dos salas y el exterior, además de la temperatura exterior. En ambas gráficas se puede ver cómo los gradientes presentan las oscilaciones muy parecidas a la temperatura exterior.

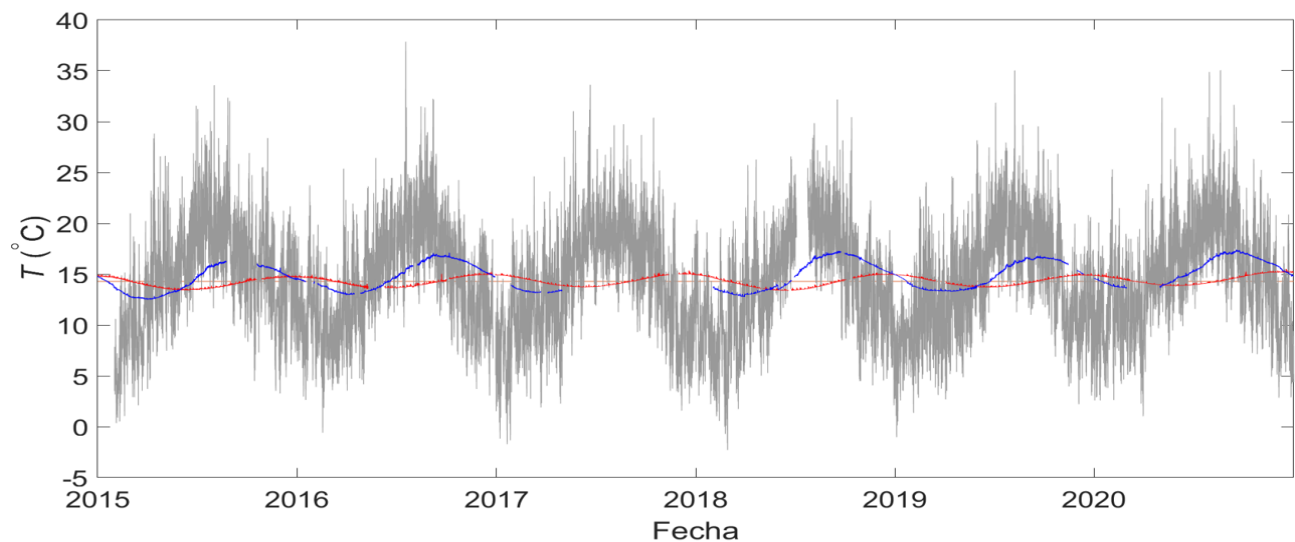


Figura 4: Series temporales de la temperatura del exterior de la cueva (gris), la Sala de Polícromos (rojo) y el Hall (azul) desde 2015 hasta 2020.

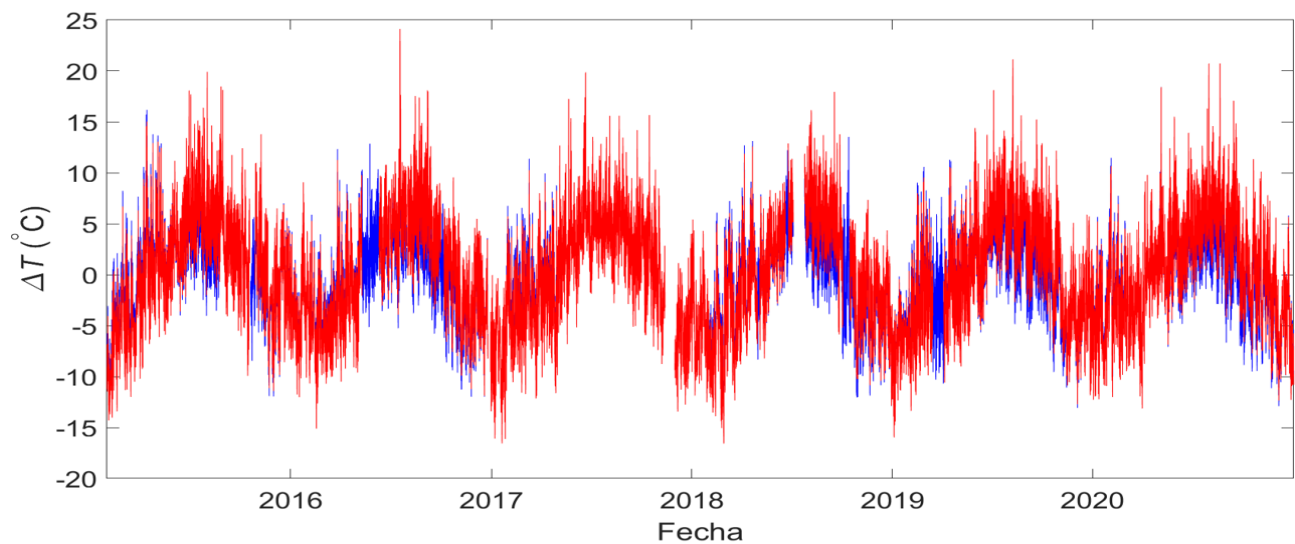


Figura 5: Series temporales del gradiente de temperatura entre el exterior y el Hall (azul) y del gradiente entre el exterior y la Sala de Polícromos (rojo) desde 2015 hasta 2020.

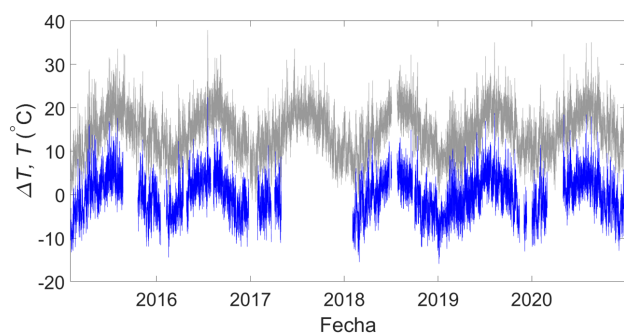


Figura 6: Series temporales de la temperatura exterior (gris) y del gradiente de temperatura entre el exterior y el Hall (azul) desde 2015 hasta 2020.

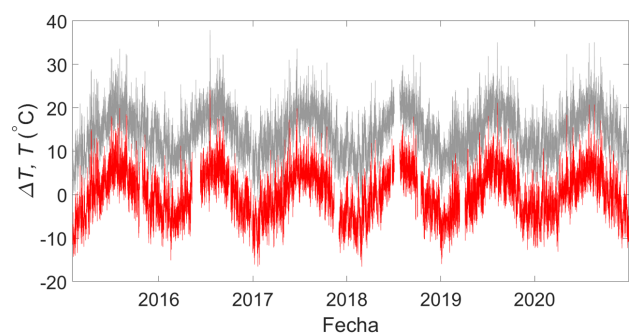


Figura 7: Series temporales de la temperatura exterior (gris) y del gradiente de temperatura entre el exterior y en la Sala de Polícromos (rojo) desde 2015 hasta 2020.

Las series temporales de la concentración de CO_2 y de radón presentan un carácter estacional, tanto en la Sala de Polícromos como en el Hall. Las mayores concentraciones se presentan entre noviembre y abril y las menores concentraciones entre junio y octubre [6]. En la Figura 8 se muestra la serie temporal de concentración de Rn para ambas salas y en la Figura 9 la serie temporal de la concentración de CO_2 para las mismas salas.

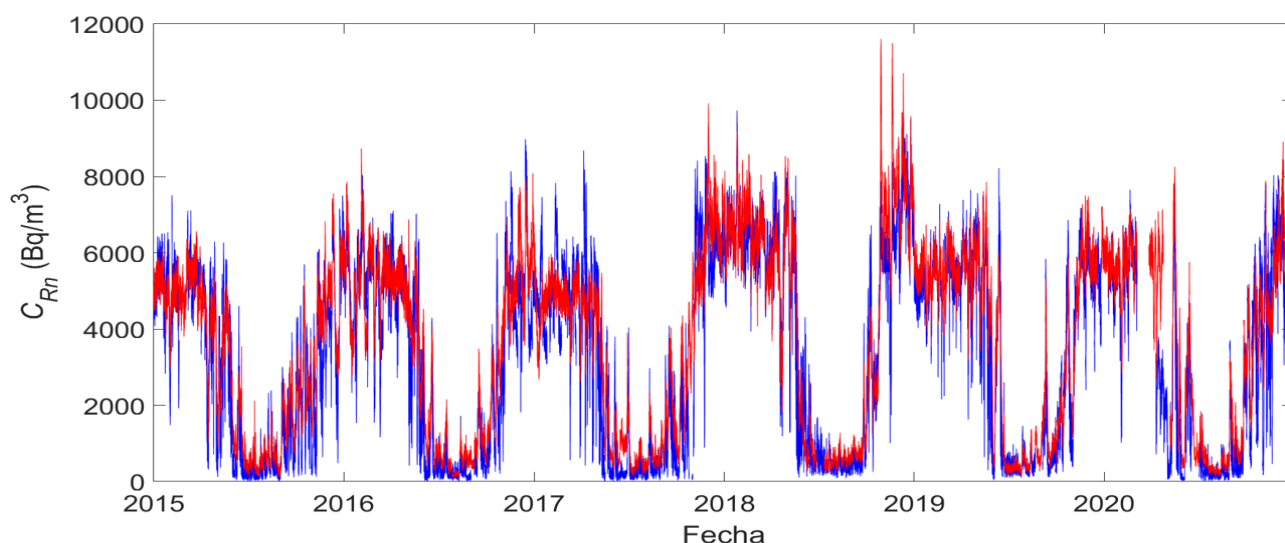


Figura 8: Serie temporal de la concentración de radón en la Sala de Polícromos (rojo) y en el Hall (azul) desde 2015 hasta 2020.

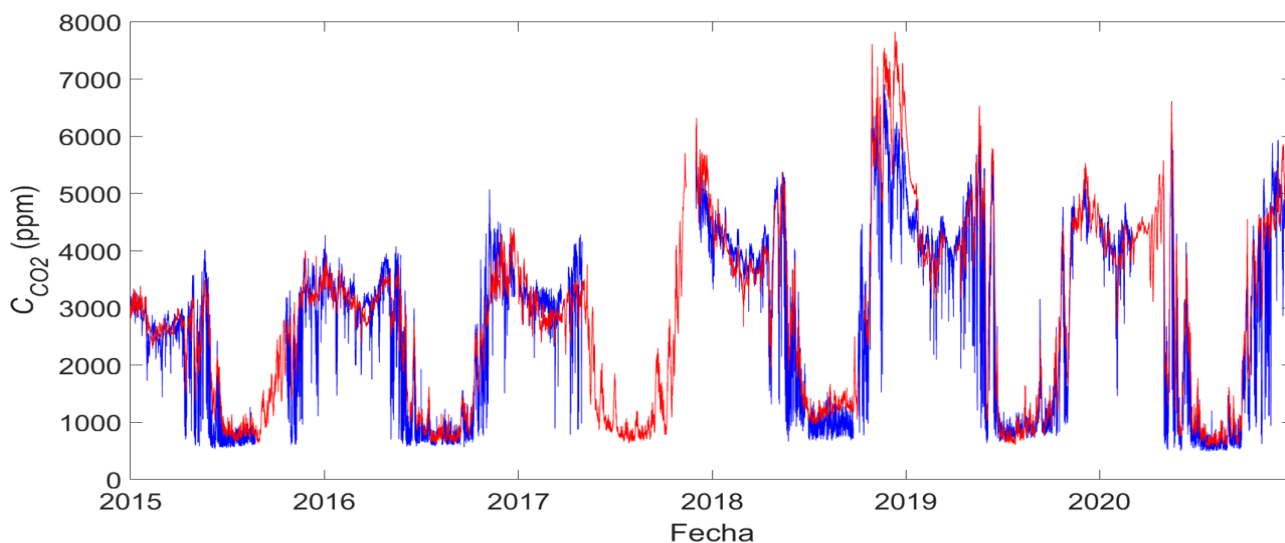


Figura 9: Serie temporal de la concentración de CO_2 en la Sala de Polícromos (rojo) y en el Hall (azul) desde 2015 hasta 2020.

El comportamiento estacional de las concentraciones de los gases se explica mediante el gradiente de temperatura. El aumento de la temperatura de un gas provoca que se reduzca su densidad y la disminución de la temperatura provoca lo contrario. De esta forma, si se tiene una masa de aire cálido que intercepta por debajo a otra masa de aire frío, esta última va a descender por gravedad y a desplazar hacia arriba a la masa de aire cálido.

En invierno el gradiente es negativo, es decir, la atmósfera exterior tiene menor temperatura que la atmósfera del interior de la cueva. Esto provoca que el aire exterior sea más denso que el interior. A pesar de estas diferencias de densidades, el aire exterior no desciende a través de las grietas de las rocas situadas por encima de la cueva debido a que están obstruidas por la humedad. Esto provoca que la cueva apenas ventile y los gases se acumulen en su interior. Cuando termina el invierno, los días comienzan a ser más cálidos, provocando la evaporación del agua del suelo y de las grietas de las rocas. De esta forma la cueva puede comenzar la ventilación. El gradiente de temperatura se hace positivo, es decir, la temperatura del

exterior es mayor que en el interior. Esto provoca que el aire del exterior sea menos denso que el del interior. Entonces, el aire del interior desciende a través de las grietas de las rocas situadas por debajo de la cueva, provocando que el aire del exterior entre por las grietas que están sobre la cueva. En verano el gradiente de temperatura es máximo y se ha evaporado la máxima cantidad de agua de las grietas, provocando la mayor ventilación de las salas. Se puede ver en las gráficas anteriores que la concentración de radón y CO_2 es la mínima. Cuando termina el verano, el gradiente de temperatura comienza a disminuir y se empieza a acumular agua en las grietas procedente de las precipitaciones. Continúa habiendo desgasificación pero en menor medida. Las concentraciones de los gases en las salas comienzan a aumentar hasta el invierno donde se alcanza mínima ventilación y por lo tanto, la máxima concentración de gases. Estudiando este comportamiento se ve cómo la evolución de los dos gases ocurre paralelamente [6].

En trabajos anteriores se calcularon las correlaciones entre las concentraciones de los gases en el Hall y la Sala de Polícromos y otros parámetros con un intervalo de confianza del 95 %. Los cálculos se realizaron los datos tomados entre 2013 y 2016. Se obtuvieron grandes correlaciones negativas entre la concentración de cada gas y los gradientes de temperatura. Se obtuvo un coeficiente de correlación entorno a -0.8 entre la concentración de cada gas y los dos gradientes de temperatura (entre el exterior y Polícromos y entre el exterior y el Hall). En cambio, se obtuvieron correlaciones menores entre las concentraciones de los gases y los gradientes de presión. El coeficiente de correlación entre las concentraciones y el gradiente de presión entre el exterior y el Hall estaba entorno a -0.3 y el coeficiente entre las concentraciones y el gradiente entre el exterior y Polícromos entorno a -0.5. Estos resultados reflejan que la temperatura es un factor determinante en el comportamiento de las masas de aire [6].

A pesar de que la variación anual del gradiente de temperatura entre la atmósfera exterior y las salas presenta unas oscilaciones periódicas bien definidas, se detectaron desgasificaciones y recargas de periodo corto. Estos eventos consisten en la salida de una gran masa de aire de la cueva durante unas horas o días [6]. Conviene caracterizar estos eventos debido a su posible impacto en el transporte de materia desde el exterior que pudiera influir en las condiciones de conservación del arte rupestre.

3.3. Criterios de identificación de eventos de desgasificación y recarga

En un inicio se iban a estudiar las mayores desgasificaciones que ocurren en un tiempo máximo de un día. Estas desgasificaciones se pueden ver de forma clara en el Hall y en Polícromos se ve de forma menos clara. Los eventos de desgasificación seleccionados eran aquellos cuya variación porcentual de radón en la desgasificación durante ese periodo fuera la mayor. Parte de las desgasificaciones que se encontraron correspondían a otras más extendidas en el tiempo que tenían una gran descarga un día, las cuales no interesan. Por ejemplo esto se muestra en la figura 10. El marcador en rojo corresponde a una concentración de radón de 2380 Bq/m^3 y el verde, que es un día después corresponde a una concentración de 756 Bq/m^3 . Durante el tiempo que transcurre entre los marcadores la cantidad de radón disminuye un 68.24 % durante un día, pero ocurre dentro de una desgasificación mayor que comienza el día 25/05/2020 a las 7:00 con una concentración de 4553 Bq/m^3 .

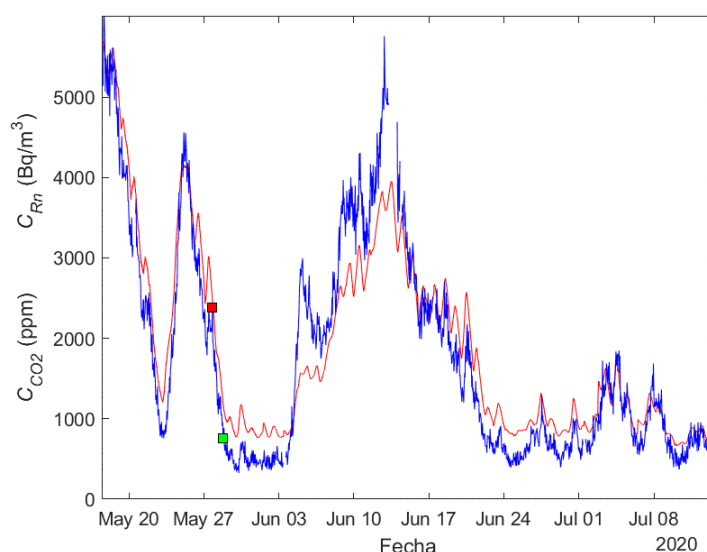


Figura 10: Concentración de radón (azul) y de CO_2 (rojo) en la Sala de Polícromos. El cuadrado en rojo marca la concentración de radón el día 27/05/2020 a las 19:00 y el cuadrado verde marca la concentración el día 28/05/2020 a las 19:00.

En la figura 11 se observan otras fechas marcadas en rojo para las cuales comienza una variación porcentual grande en un periodo de 24 horas. El problema en este caso es que el radón presenta ruido en los eventos seleccionados. Por lo tanto, no se puede tener en cuenta para realizar las correlaciones. Habría que hacer un suavizado, que se muestra en la figura 12 para eliminar el ruido y poder analizarlo. Entonces en el entorno de las fechas donde habían salido cuatro eventos, queda la mayor desgasificación que comienza el día 30/06/2015 a las 11:00 con una concentración de 466.56 Bq/m³ y termina el día 30/06/2015 a las 8:00 con una concentración de 261.36 Bq/m³, es decir, una variación de 43.98 %. El número de eventos con una variación aproximada del 40 % es muy grande y lo que se buscaba eran variaciones mayores, por lo que no se analizan los eventos que les ocurre lo mismo que esto.

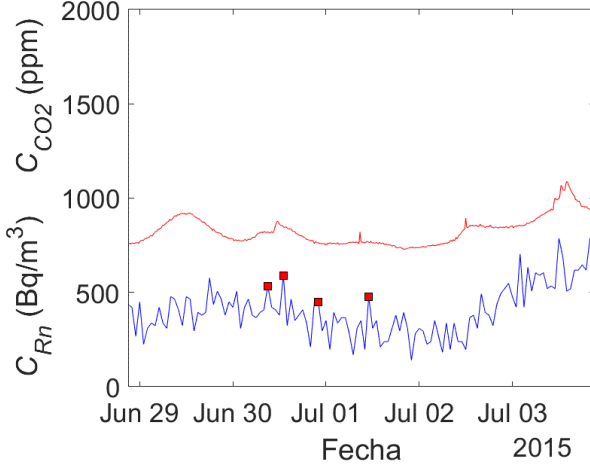


Figura 11: Concentración de radón (azul) y de CO₂ (rojo) en la Sala de Polícromos. Los cuadrado en rojo marcan la concentración de radón en los días 30/06/2015 a las 9:00, 13:00 y 22:00 y en el día 01/07/2015 a las 11:00.

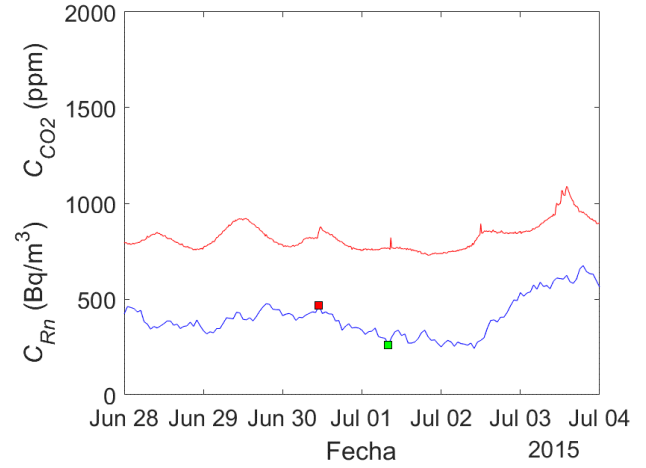


Figura 12: Suavizado de 5 horas de la concentración de radón (azul) y concentración de CO₂ (rojo) en la Sala de Polícromos. El cuadrado en rojo marca la concentración de radón el día 30/06/2015 a las 11:00 y el cuadrado verde marca la concentración el día 30/06/2015 a las 8:00

Se hubiera querido estudiar desgasificaciones que ocurran como máximo en un día, pero para el radón se observa mucho ruido y si se lleva a cabo un suavizado, las variaciones de las desgasificaciones se hacen menores debido a la disminución de ruido, ya que los picos provocaban valores más extremos. Aunque para el CO₂ se observan de manera mucho más clara las variaciones diarias. Esto se puede observar en las figuras 11 y 12.

Debido a las dificultades encontradas, se pasó a seleccionar y estudiar desgasificaciones y recargas de más larga duración a partir de su visualización en las gráficas. La forma de detectar estos episodios es a través de las concentraciones de radón y de CO₂. Cuando se observa una gran disminución de la concentración de ambos gases, quiere decir que está saliendo una masa de aire de la cueva cargada con radón y CO₂ y se está renovando con aire con menor concentración de CO₂ y prácticamente nula concentración de Rn. Cuando las concentraciones aumentan después de la desgasificación quiere decir que la sala deja de ventilarse y se acumula el aire en su interior.

3.4. Correlaciones

Para estudiar los eventos de desgasificación y recarga, se han realizado correlaciones entre pares de variables correspondientes a cada evento. Para poder realizar las correlaciones han obtenido las siguientes variables:

- Gradiente de temperatura entre el exterior de la cueva y la Sala de Polícromos: $\Delta T = T_{ext} - T_{poli}$
- Densidad del aire en la Sala de Polícromos (ρ_{poli}): obtenida cada hora en g/l según [5]
- Densidad del aire en el exterior de la cueva (ρ_{ext}): obtenida cada hora en g/l según [5]
- Gradiente de densidad entre el exterior de la cueva y la Sala de Polícromos: $\Delta \rho = \rho_{ext} - \rho_{poli}$

Una vez seleccionados los episodios de desgasificación y recarga, se ha procedido a la correlación entre variables para estos episodios. Para cada evento las correlaciones se han hecho en tres fases: la desgasificación que es el tiempo en que disminuyen las concentraciones de los gases traza, la recarga que es el tiempo en el que las concentraciones aumentan y el evento completo que es la desgasificación más la recarga. Se ha calculado el coeficiente de correlación de Pearson que

medir la relación estadística entre las variables y el p-valor que indica si la correlación es significativa o no. Los pares de variables para los cuales se han realizado correlaciones han sido los siguientes:

- C_{Rn} y ΔT
- C_{CO_2} y ΔT
- C_{Rn} y $\Delta \rho$
- C_{CO_2} y $\Delta \rho$
- C_{Rn} y C_{CO_2}

Para las correlaciones entre C_{Rn} y ΔT , entre C_{Rn} y $\Delta \rho$ y entre C_{Rn} y C_{CO_2} se han utilizado valores medidos cada hora porque la concentración de radón se ha medido cada hora. Para ello, se han tomado los valores de las otras variables correspondientes a las horas en que se ha medido el radón y se han desechado el resto de valores. En cambio, para las correlaciones entre C_{CO_2} y ΔT y entre C_{CO_2} y $\Delta \rho$, se han tomado todos los valores correspondientes ya que se tiene el valor de todas cada 15 minutos.

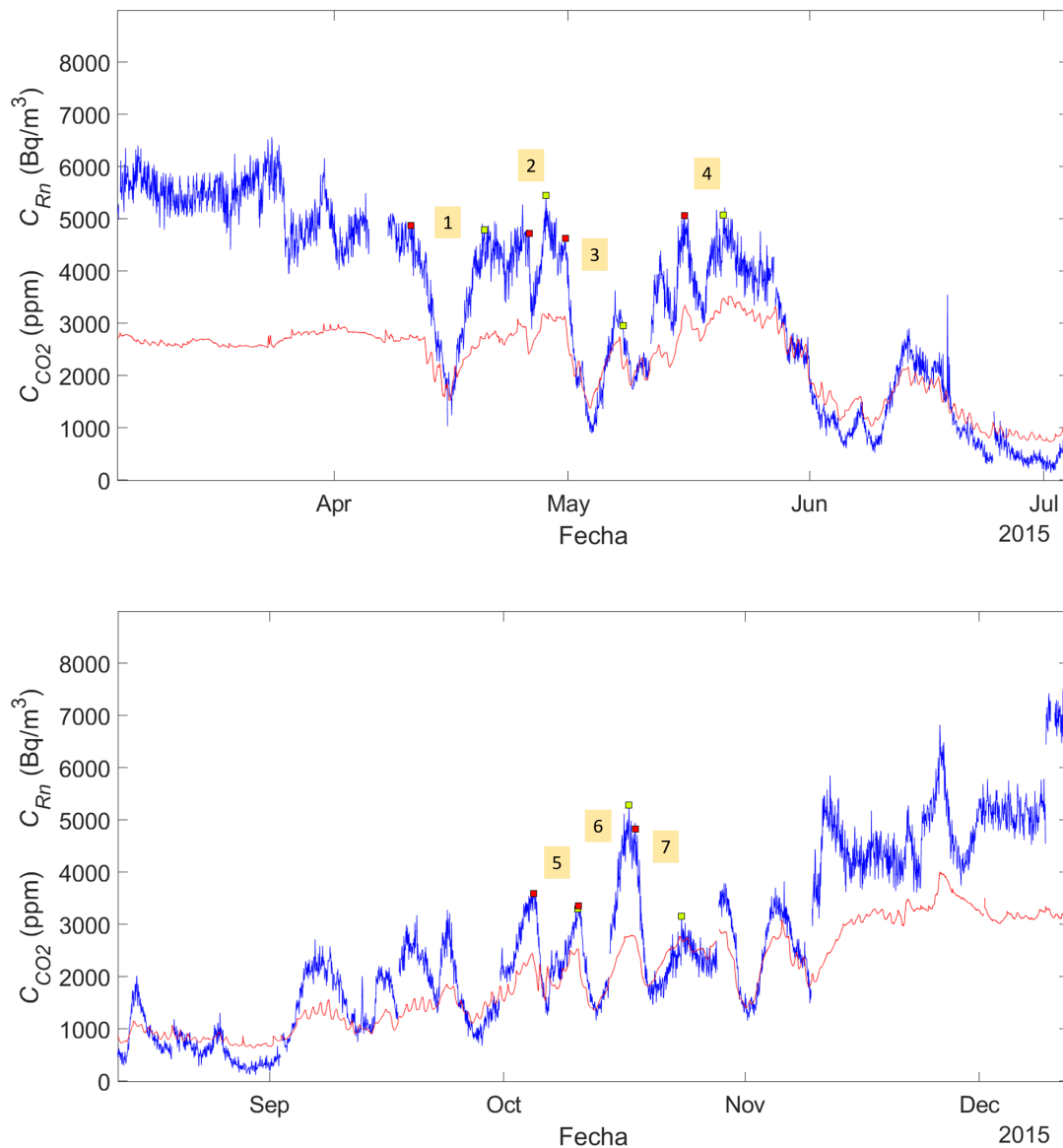
Para poder realizar las correlaciones se ha tenido en cuenta que faltan algunos datos en determinadas fechas. Por lo tanto, a la hora de obtener la correlación entre dos variables, se desechan los datos correspondientes a una fecha en la cual no se tiene el valor de una de las dos variables. En algunos eventos seleccionados no se ha podido llevar a cabo la correlación debido a que no se tienen datos de una de las variables. Esto ocurre con los eventos 7, 8, 9 y 10 para los cuales no se tienen los datos de los gradientes de temperatura y densidad correspondientes a la desgasificación, a la recarga y/o a ambas.

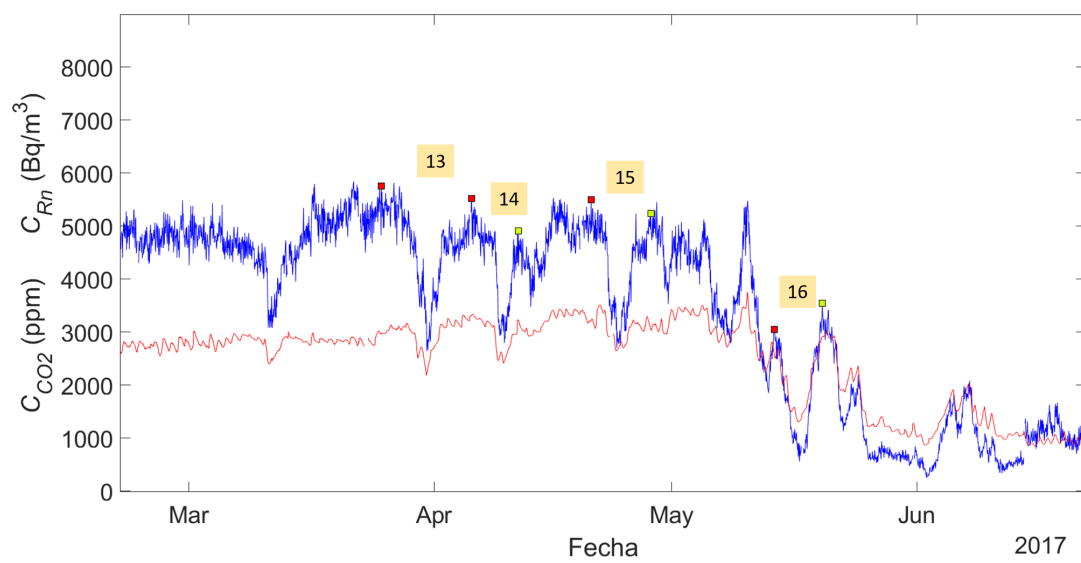
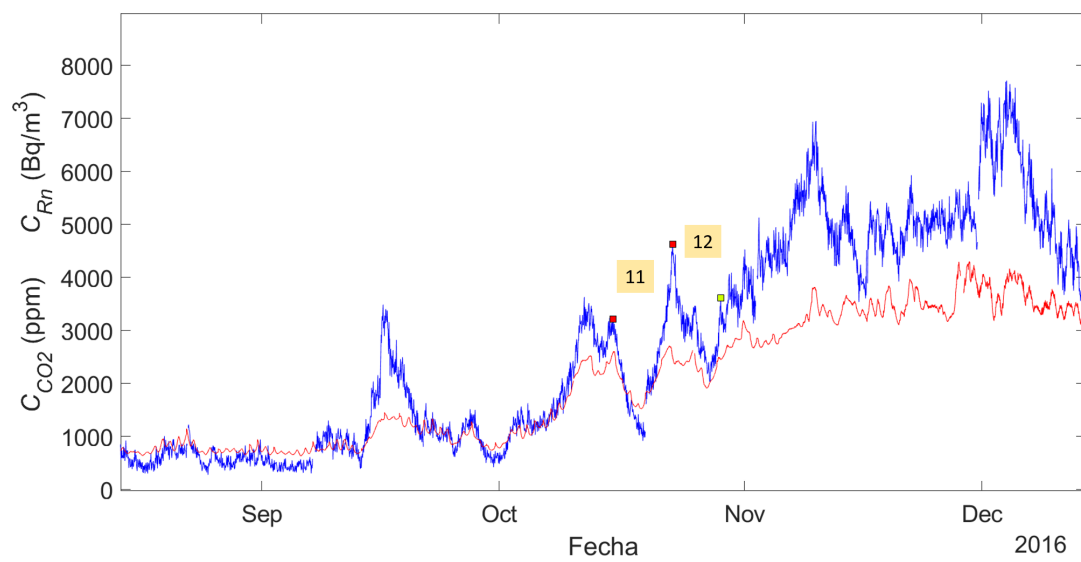
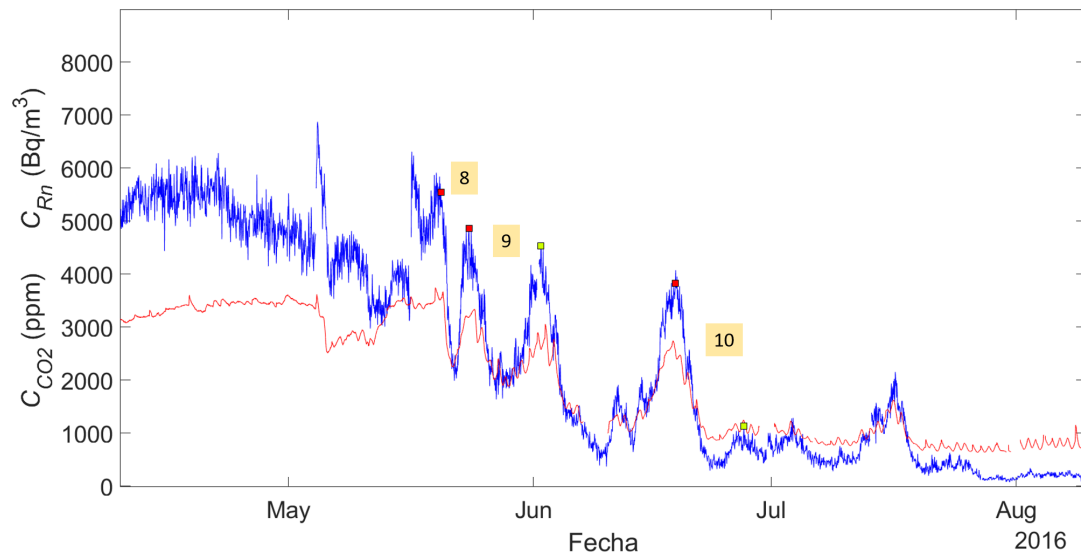
4. Resultados y discusión

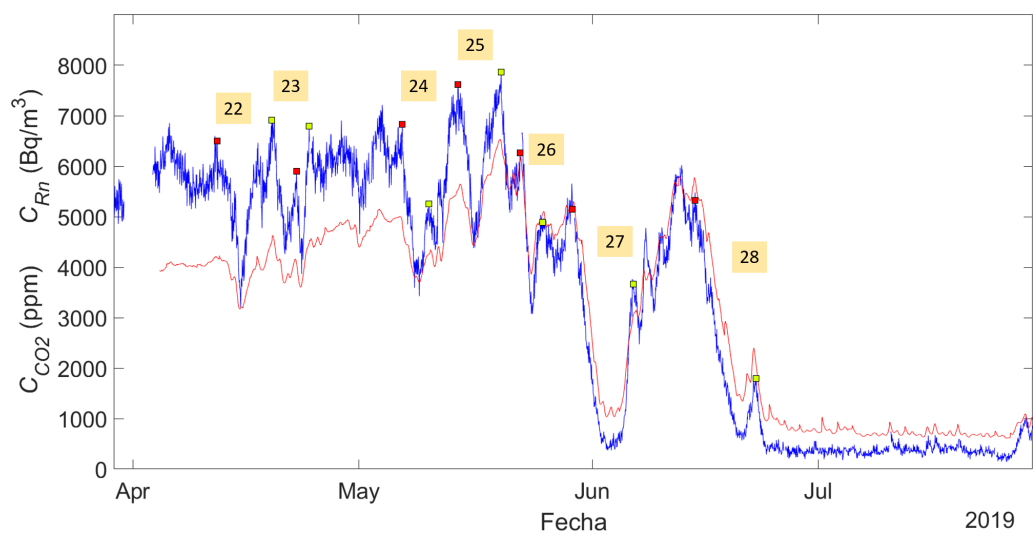
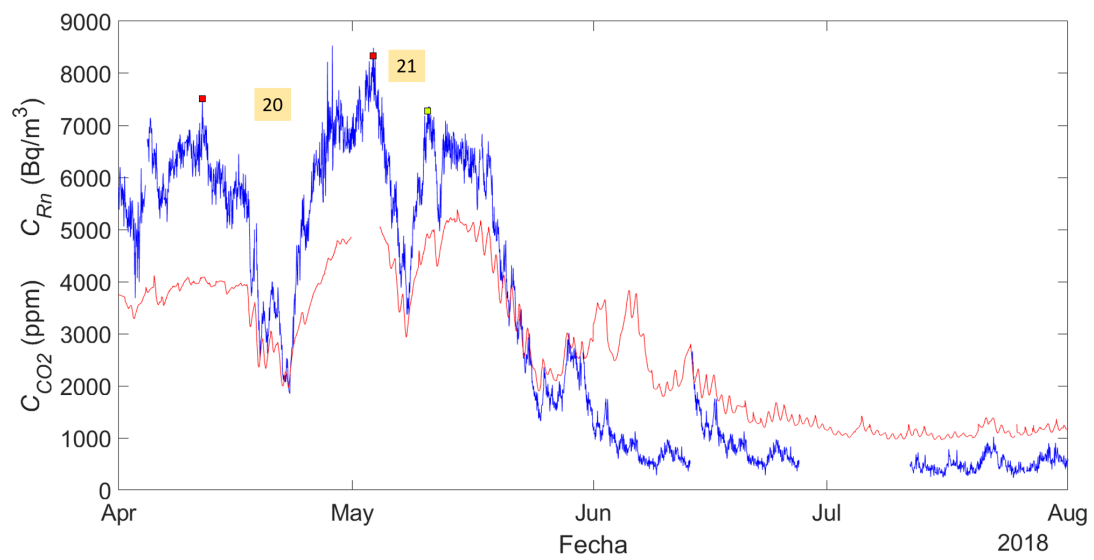
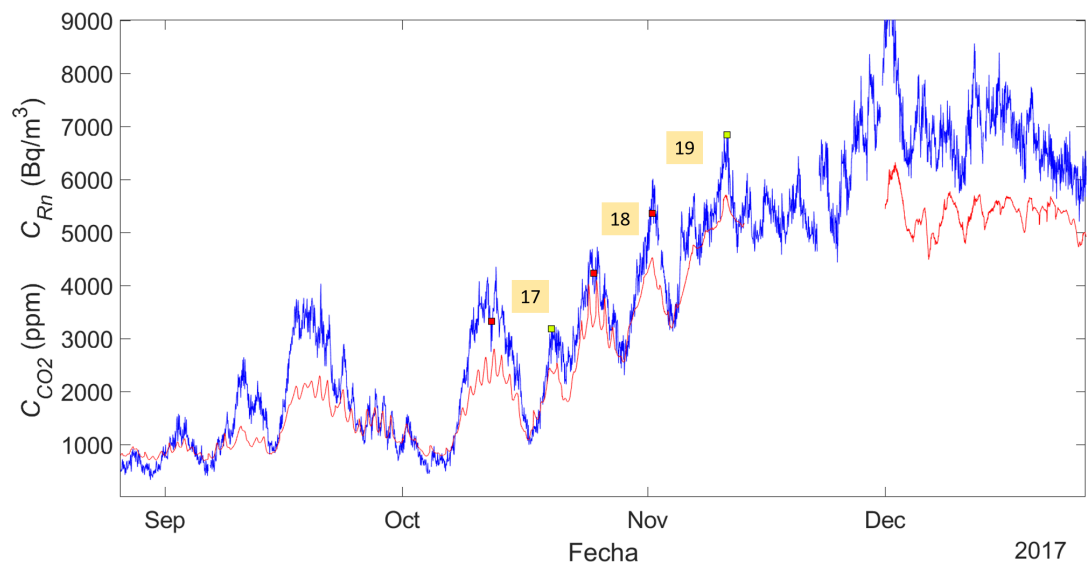
4.1. Inventario de eventos

En la Figura 13 se pueden observar los 37 eventos estudiados de desgasificación y recarga numerados. Se ha marcado con cuadrados el inicio y final de estos en la gráfica del radón. Para la desgasificación y recarga del CO_2 se han considerado las mismas fechas que para el Rn aunque no aparezca marcado en la gráfica. Esto se muestra más en detalle en la Figura 14 donde se muestran el primer evento de desgasificación y recarga seleccionado.

En la tabla 1 se muestran las fechas en las que ocurren los 37 eventos de desgasificación estudiados.







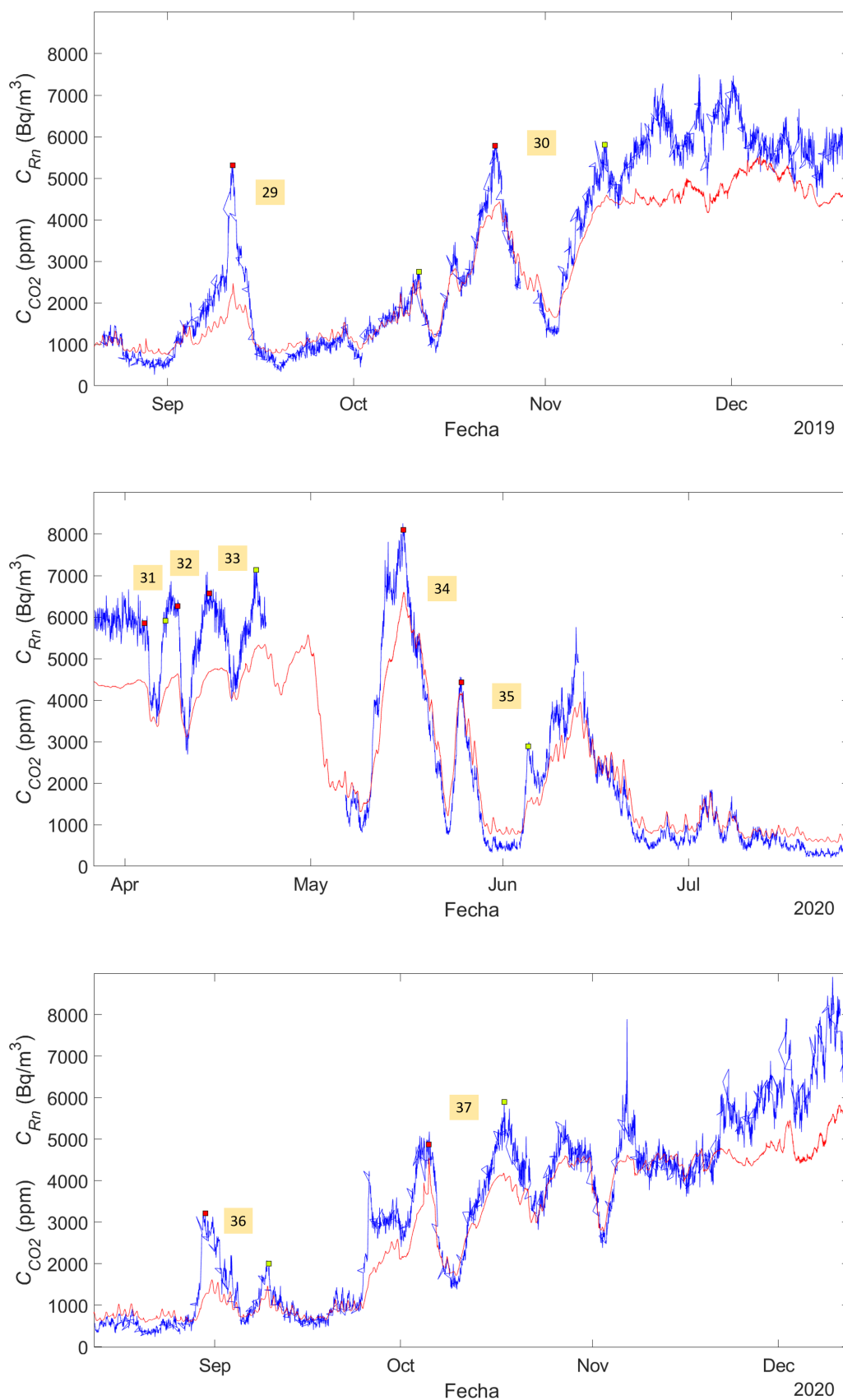


Figura 13: Concentración de radón (azul) y concentración de CO₂ (rojo) en la Sala de Polícromos. Se han señalado los eventos de degasificación seleccionados con el número correspondiente que sirve para identificarlos. Los cuadrados rojos indican cuando comienza la degasificación del Rn de cada evento y los amarillos cuando termina la recarga. Si hay dos eventos seguidos no se observa el cuadrado amarillo del primero porque el rojo del siguiente se ha superpuesto.

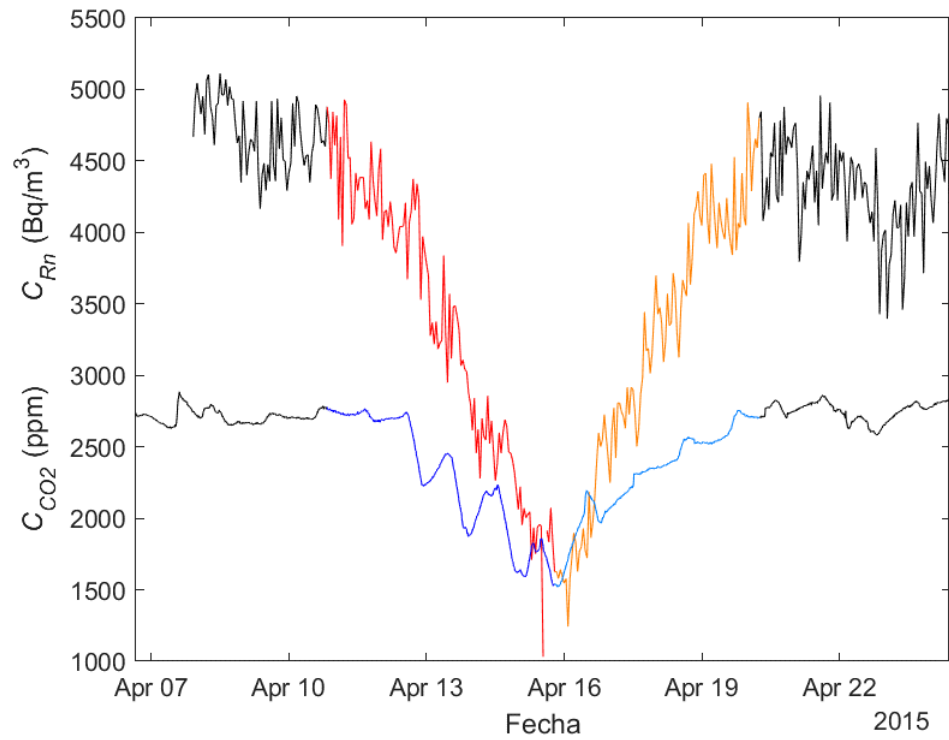


Figura 14: Evento 1 de desgasificación en la Sala de Polícromos. Se muestra la desgasificación del radón (rojo) y la recarga (naranja) y la desgasificación del CO_2 (azul oscuro) y la recarga (azul claro).

i	Inicio desgasificación	Fin descarga/Inicio recarga	Fin recarga
1	10-Abr-2015 20 h	15-Abr-2015 19 h	20-Abr-2015 06 h
2	26-Abr-2015 00 h	26-Abr-2015 08 h	28-Abr-2015 04 h
3	30-Abr-2015 16 h	04-May-2015 04 h	08-May-2015 01 h
4	15-May-2015 23 h	18-May-2015 07 h	20-May-2015 22 h
5	04-Oct-2015 20 h	06-Oct-2015 14 h	10-Oct-2015 13 h
6	10-Oct-2015 15 h	12-Oct-2015 21 h	17-Oct-2015 02 h
7	17-Oct-2015 22 h	19-Oct-2015 20 h	23-Oct-2015 20 h
8	20-May-2016 07 h	21-May-2016 23 h	23-May-2016 20 h
9	23-May-2016 20 h	28-May-2016 09 h	01-Jun-2016 22 h
10	18-Jun-2016 22 h	23-Jun-2016 20 h	27-Jun-2016 14 h
11	15-Oct-2016 09 h	19-Oct-2016 05 h	22-Oct-2016 22 h
12	22-Oct-2016 22 h	27-Oct-2016 16 h	29-Oct-2016 00 h
13	25-Mar-2017 08 h	31-Mar-2017 05 h	05-Abr-2017 17 h
14	05-Abr-2017 17 h	09-Abr-2017 21 h	11-Abr-2017 15 h
15	20-Abr-2017 20 h	24-Abr-2017 02 h	28-Abr-2017 09 h
16	14-May-2017 00 h	17-May-2017 03 h	20-May-2017 01 h
17	12-Oct-2017 07 h	16-Oct-2017 20 h	19-Oct-2017 20 h
18	25-Oct-2017 05 h	28-Oct-2017 16 h	01-Nov-2017 13 h
19	01-Nov-2017 13 h	04-Nov-2017 02 h	11-Nov-2017 01 h
20	11-Abr-2018 18 h	22-Abr-2018 10 h	03-May-2018 16 h
21	03-May-2018 16 h	08-May-2018 07 h	10-May-2018 17 h
22	12-Abr-2019 06 h	15-Abr-2019 08 h	19-Abr-2019 11 h
23	22-Abr-2019 18 h	23-Abr-2019 10 h	24-Abr-2019 10 h
24	06-May-2019 19 h	09-May-2019 01 h	10-May-2019 08 h
25	14-May-2019 04 h	16-May-2019 10 h	19-May-2019 22 h
26	22-May-2019 10 h	23-May-2019 22 h	25-May-2019 10 h
27	29-May-2019 09 h	02-Jun-2019 21 h	06-Jun-2019 11 h
28	14-Jun-2019 15 h	20-Jun-2019 22 h	22-Jun-2019 19 h
29	11-Sep-2019 13 h	19-Sep-2019 12 h	11-Oct-2019 14 h
30	23-Oct-2019 21 h	02-Nov-2019 07 h	10-Nov-2019 13 h
31	04-Abr-2020 04 h	05-Abr-2020 18 h	07-Abr-2020 14 h
32	09-Abr-2020 12 h	11-Abr-2020 01 h	14-Abr-2020 16 h
33	14-Abr-2020 16 h	18-Abr-2020 09 h	22-Abr-2020 04 h
34	15-May-2020 23 h	23-May-2020 03 h	25-May-2020 08 h
35	25-May-2020 08 h	30-May-2020 01 h	05-Jun-2020 03 h
36	30-Ago-2020 11 h	05-Sep-2020 19 h	09-Sep-2020 18 h
37	05-Oct-2020 13 h	09-Oct-2020 14 h	17-Oct-2020 17 h

Tabla 1: Fechas correspondientes a los 37 eventos de desgasificación seleccionados. Inicio desgasificación es la fecha en que comienza la desgasificación, es decir, cuando comienza el evento. Fin descarga/Inicio recarga es la fecha de fin de desgasificación e inicio de la recarga. Fin recarga indica la fecha en la cual termina la recarga, es decir, cuando termina el evento seleccionado.

4.2. Correlaciones

En las tablas 2, 4 y 6 se recogen los datos correspondientes a las correlaciones entre las concentraciones de los gases y el gradiente de temperatura de cada evento y las tablas 3, 5 y 7 recogen los datos relativos a las correlaciones entre las concentraciones y el gradiente de densidad. Además, en la tabla 8 se recogen los resultados de las correlaciones entre las concentraciones. El color rojo de los p-valores significa que son mayores a 0.05 y por tanto, las correlaciones no se pueden considerar significativas. El color verde de los coeficientes de correlación entre el gradiente de temperatura y la concentraciones de los gases significa que son negativos, lo cual interesa porque la hipótesis es que las concentraciones de los gases tienen una correlación negativa con el gradiente de temperatura. En el caso de las correlaciones entre el gradiente de densidad y los gases el color verde indica que son positivos. El color azul del número de identificación de los sucesos significa que las correlaciones entre concentraciones y gradiente de temperatura son negativas y significativas. En el caso de las correlaciones entre los gases y gradiente de densidad, el color azul indica que son significativas y positivas. Lo mismo ocurre para las correlaciones entre los gases.

i	ΔT y C_{Rn}			ΔT y C_{CO_2}		
	N	r	$p - v$	N	r	$p - v$
1	119	-0.62	0	477	-0.60	0
2	9	0.92	0	33	-0.91	0
3	85	0.33	0.0019	337	0.29	0
4	57	-0.15	0.27	225	0.01	0.86
5	43	0.32	0.04	169	0.45	0
6	55	0.63	0	217	0.72	0
7	31	0.56	0.0012	122	0.65	0
8						
9						
10	119	-0.43	0	474	-0.35	0
11	93	0.37	0	369	0.47	0
12	109	0.36	0	434	0.14	0.003
13	142	-0.36	0	565	-0.31	0
14	101	-0.16	0.11	401	-0.27	0
15	67	-0.02	0.89	267	0.16	0.010
16	76	-0.24	0.04	301	-0.21	0
17	110	-0.42	0	437	-0.44	0
18	84	0.28	0.009	333	0.53	0
19	57	0.51	0	245	0.68	0
20	253	-0.50	0	1025	-0.52	0
21	91	-0.17	0.11	361	-0.22	0
22	75	-0.35	0	297	-0.40	0
23	17	0.89	0	65	0.94	0
24	55	-0.21	0.12	217	-0.25	0
25	55	0.03	0.86	217	0.12	0.07
26	32	0.35	0.05	145	0.45	0
27	103	-0.32	0	433	-0.31	0
28	152	-0.29	0	605	-0.28	0
29	188	-0.28	0	765	-0.26	0
30	165	-0.49	0	905	-0.33	0
31	39	-0.28	0.09	153	-0.48	0
32	38	0.69	0	149	0.69	0
33	90	0.43	0	357	0.56	0
34	168	-0.44	0	689	-0.41	0
35	114	-0.41	0	453	-0.43	0
36	153	-0.23	0	609	-0.26	0
37	93	0.24	0.02	389	0.20	0

Tabla 2: Datos obtenidos al realizar la correlación de la desgasificación entre ΔT y C_{Rn} y entre ΔT y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el $p - valor$. Los $p - valores$ menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

i	$\Delta \rho$ y C_{Rn}			$\Delta \rho$ y C_{CO_2}		
	N	r	$p - v$	N	r	$p - v$
1	119	0.61	0	477	0.59	0
2	9	-0.91	0	33	0.90	0
3	85	-0.35	0	337	-0.31	0
4	57	0.14	0.3	225	-0.02	0.7
5	43	-0.33	0.03	169	-0.46	0
6	55	-0.64	0	217	-0.73	0
7	31	-0.57	0	122	-0.67	0
8						
9						
10						
11	93	-0.39	0	369	-0.49	0
12	109	-0.35	0.0002	434	-0.15	0.002
13	142	0.36	0	565	0.30	0
14	101	0.15	0.12	401	0.26	0
15	67	0.01	0.9	267	-0.16	0.008
16	76	0.22	0.05	301	0.19	0.001
17	110	0.41	0	437	0.43	0
18	84	-0.29	0.007	333	-0.53	0
19	57	-0.53	0	245	-0.69	0
20	253	0.48	0	1023	0.50	0
21	91	0.15	0.16	361	0.20	0
22	72	0.30	0.012	285	0.35	0
23	17	-0.89	0	65	-0.94	0
24	55	0.21	0.13	217	0.24	0.0003
25	55	-0.03	0.8	217	-0.13	0.05
26	32	-0.37	0.04	145	-0.47	0
27	103	0.28	0.004	433	0.27	0
28	152	0.22	0.008	605	0.20	0
29	188	0.25	0.0006	765	0.23	0
30	165	0.46	0	905	0.30	0
31	39	0.28	0.09	153	0.48	0
32	38	-0.71	0	149	-0.71	0
33	90	-0.44	0	357	-0.58	0
34	168	0.40	0	689	0.37	0
35	114	0.38	0	453	0.39	0
36	153	0.22	0.006	609	0.26	0
37	93	-0.29	0.004	389	-0.26	0

Tabla 3: Datos obtenidos al realizar la correlación de la desgasificación entre $\Delta \rho$ y C_{Rn} y entre $\Delta \rho$ y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el $p - valor$. Los $p - valores$ menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

i	ΔT y C_{Rn}			ΔT y C_{CO_2}		
	N	r	p - v	N	r	p - v
1	108	-0.48	0	429	-0.31	0
2	45	-0.57	0	177	-0.44	0
3	94	-0.33	0	373	-0.39	0
4	64	-0.37	0	253	-0.20	0
5	96	0.00	0.97	381	0.20	0
6	99	-0.41	0	405	-0.39	0
7						
8						
9						
10	91	-0.13	0.22	361	0.00	0.97
11	89	-0.05	0.67	357	-0.20	0
12	33	-0.19	0.28	129	0.07	0.40
13	129	-0.28	0	529	-0.15	0
14	43	0.36	0.02	169	0.47	0
15	104	-0.79	0	413	-0.66	0
16	66	-0.41	0	281	-0.38	0
17	69	-0.25	0.04	289	-0.22	0
18	94	-0.26	0.01	373	-0.27	0
19	168	-0.15	0.05	669	-0.22	0
20	203	-0.66	0	812	-0.75	0
21	59	-0.10	0.47	233	-0.11	0.08
22	100	0.04	0.72	397	-0.01	0.79
23	25	-0.77	0	97	-0.87	0
24	32	0.16	0.39	125	0.39	0
25	85	-0.12	0.28	337	-0.12	0.03
26	37	0.26	0.12	145	0.32	0
27	87	-0.46	0	345	-0.47	0
28	46	0.67	0	181	0.53	0
29	526	-0.30	0	2121	-0.24	0
30	199	-0.73	0	793	-0.73	0
31	45	-0.41	0	177	-0.46	0
32	88	-0.33	0	349	-0.27	0
33	92	-0.33	0	365	-0.25	0
34	54	0.03	0.85	213	0.10	0.16
35	142	-0.42	0	585	-0.26	0
36	92	0.06	0.59	381	0.14	0.01
37	196	-0.50	0	781	-0.56	0

Tabla 4: Datos obtenidos al realizar la correlación de la recarga entre ΔT y C_{Rn} y entre ΔT y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el p - valor. Los p - valores menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

i	$\Delta \rho$ y C_{Rn}			$\Delta \rho$ y C_{CO_2}		
	N	r	p - v	N	r	p - v
1	108	0.47	0	429	0.30	0
2	45	0.56	0	177	0.42	0
3	94	0.32	0.0015	373	0.38	0
4	64	0.36	0.004	253	0.18	0.004
5	96	0.00	1	381	-0.21	0
6	99	0.40	0.0001	405	0.38	0
7						
8						
9						
10						
11	89	0.04	0.7	357	0.20	0.0002
12	33	0.18	0.3	129	-0.09	0.3
13	128	0.25	0.005	524	0.11	0.009
14	43	-0.37	0.015	169	-0.48	0
15	99	0.78	0	393	0.66	0
16	66	0.38	0.0015	281	0.35	0
17	69	0.23	0.06	289	0.20	0.0007
18	94	0.23	0.03	373	0.24	0
19	168	0.12	0.13	669	0.19	0
20	202	0.64	0	807	0.73	0
21	59	0.05	0.7	233	0.07	0.29
22	100	-0.05	0.6	395	0.01	0.9
23	25	0.77	0	97	0.87	0
24	32	-0.17	0.30	125	-0.40	0
25	83	0.09	0.4	332	0.09	0.12
26	37	-0.30	0.07	145	-0.37	0
27	87	0.44	0	345	0.44	0
28	46	-0.67	0	181	-0.52	0
29	526	0.29	0	2121	0.23	0
30	198	0.71	0	789	0.71	0
31	45	0.41	0.005	177	0.46	0
32	88	0.30	0.005	349	0.24	0
33	92	0.29	0.005	365	0.21	0.0001
34	54	-0.07	0.6	213	-0.14	0.03
35	142	0.41	0	585	0.25	0
36	92	-0.06	0.6	381	-0.14	0.006
37	196	0.47	0	781	0.54	0

Tabla 5: Datos obtenidos al realizar la correlación de la recarga entre $\Delta \rho$ y C_{Rn} y entre $\Delta \rho$ y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el p - valor. Los p - valores menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

i	ΔT y C_{Rn}			ΔT y C_{CO_2}		
	N	r	$p - v$	N	r	$p - v$
1	226	-0.43	0	905	-0.45	0
2	53	-0.50	0	209	-0.43	0
3	178	-0.08	0.28	709	-0.20	0
4	120	-0.32	0	477	-0.19	0
5	138	0.09	0.28	549	-0.07	0.11
6	153	-0.40	0	621	-0.42	0
7	31	0.56	0	122	0.65	0
8						
9						
10	209	-0.17	0.01	833	-0.09	0.008
11	181	-0.19	0.01	725	-0.22	0
12	141	0.40	0	562	0.15	0
13	270	-0.22	0	1093	-0.31	0
14	143	-0.07	0.38	569	-0.17	0
15	170	-0.28	0	679	-0.07	0.09
16	141	-0.28	0	581	-0.30	0
17	178	-0.05	0.47	725	-0.18	0
18	177	-0.15	0.04	705	-0.19	0
19	224	-0.20	0	913	-0.44	0
20	455	-0.58	0	1836	-0.64	0
21	149	-0.17	0.04	593	-0.22	0
22	174	-0.11	0.15	693	-0.17	0
23	41	-0.42	0.01	161	-0.66	0
24	86	-0.02	0.86	341	-0.01	0.89
25	139	-0.07	0.42	553	-0.20	0
26	68	0.45	0	289	0.51	0
27	189	-0.11	0.14	777	0.00	0.97
28	197	-0.19	0.01	785	-0.20	0
29	713	-0.19	0	2885	-0.25	0
30	363	-0.61	0	1697	-0.48	0
31	83	-0.25	0.02	329	-0.30	0
32	125	-0.16	0.08	497	-0.10	0.02
33	181	0.21	0	721	0.16	0
34	221	-0.29	0	901	-0.25	0
35	255	-0.26	0	1037	-0.17	0
36	244	-0.06	0.38	989	-0.07	0.02
37	288	-0.38	0	1169	-0.47	0

Tabla 6: Datos obtenidos al realizar la correlación de la desgasificación y recarga entre ΔT y C_{Rn} y entre ΔT y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el $p - valor$. Los $p - valores$ menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

i	$\Delta \rho$ y C_{Rn}			$\Delta \rho$ y C_{CO_2}		
	N	r	$p - v$	N	r	$p - v$
1	226	0.42	0	905	0.44	0
2	53	0.50	0.0002	209	0.41	0
3	178	0.07	0.4	709	0.19	0
4	120	0.31	0.0006	477	0.17	0.0002
5	138	-0.09	0.3	549	0.06	0.17
6	153	0.40	0	621	0.41	0
7	31	-0.57	0.0007	122	-0.67	0
8						
9						
10						
11	181	0.18	0.013	725	0.21	0
12	141	-0.39	0	562	-0.16	0.0002
13	269	0.23	0.0002	1088	0.28	0
14	143	0.07	0.41	569	0.16	0
15	165	0.28	0.0003	659	0.06	0.12
16	141	0.26	0.0017	581	0.28	0
17	178	0.03	0.7	725	0.16	0
18	177	0.14	0.07	705	0.17	0
19	224	0.18	0.008	913	0.42	0
20	454	0.57	0	1829	0.62	0
21	149	0.14	0.09	593	0.19	0
22	171	0.07	0.3	679	0.14	0.0002
23	41	0.43	0.005	161	0.66	0
24	86	0.01	0.92	341	0.00	1
25	137	0.06	0.52	548	0.18	0
26	68	-0.47	0	289	-0.53	0
27	189	0.07	0.4	777	-0.05	0.17
28	197	0.12	0.08	785	0.13	0.0002
29	713	0.17	0	2885	0.23	0
30	362	0.59	0	1693	0.46	0
31	83	0.26	0.0196	329	0.31	0
32	125	0.14	0.11	497	0.09	0.05
33	181	-0.23	0.0018	721	-0.18	0
34	221	0.24	0.0003	901	0.20	0
35	255	0.21	0.0006	1037	0.12	0.0001
36	244	0.05	0.4	989	0.07	0.03
37	288	0.35	0	1169	0.45	0

Tabla 7: Datos obtenidos al realizar la correlación de la desgasificación y recarga entre $\Delta \rho$ y C_{Rn} y entre $\Delta \rho$ y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el $p - valor$. Los $p - valores$ menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

C_{Rn} y C_{CO_2}						
	Descarga		Recarga		Completo	
i	N	r	N	r	N	r
1	119	0.92	108	0.93	226	0.91
2	9	-0.91	45	0.88	53	0.71
3	85	0.93	94	0.93	178	0.90
4	57	0.88	64	0.73	120	0.80
5	43	0.64	96	0.66	138	0.59
6	55	0.96	99	0.98	153	0.97
7	47	0.96	97	0.78	143	0.48
8	41	0.94	46	0.95	86	0.92
9	110	0.92	105	0.85	214	0.85
10	119	0.97	91	0.81	209	0.98
11	93	0.96	89	0.93	181	0.95
12	109	0.70	33	0.78	141	0.69
13	142	0.90	129	0.93	270	0.76
14	101	0.93	43	0.94	143	0.93
15	67	0.81	104	0.88	170	0.85
16	76	0.94	66	0.97	141	0.95
17	110	0.92	69	0.95	178	0.91
18	84	0.84	94	0.95	177	0.91
19	57	0.93	168	0.87	224	0.85
20	253	0.95	203	0.95	455	0.95
21	91	0.94	59	0.96	149	0.94
22	75	0.94	100	0.94	174	0.94
23	17	0.86	25	0.95	41	0.89
24	55	0.95	32	0.94	86	0.95
25	55	0.97	85	0.98	139	0.89
26	32	0.98	37	0.95	68	0.96
27	103	0.98	87	0.98	189	0.96
28	152	0.99	46	0.89	197	0.99
29	188	0.98	526	0.95	713	0.87
30	165	0.96	199	0.97	363	0.95
31	39	0.94	45	0.95	83	0.92
32	38	0.98	88	0.97	125	0.97
33	90	0.86	92	0.95	181	0.89
34	168	0.98	54	0.98	221	0.98
35	114	0.98	142	0.92	255	0.95
36	153	0.91	92	0.94	244	0.92
37	93	0.97	196	0.98	288	0.97

Tabla 8: Datos obtenidos al realizar la correlación entre C_{Rn} y C_{CO_2} para las tres fases de cada evento. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer las correlaciones N y los coeficientes de correlación r . Los p-valores son 0 en todas las correlaciones.

En la tabla 9 se muestran los coeficientes de correlación medios entre el gradiente de temperatura y las concentraciones y sus desviaciones estándar necesarios para analizar las correlaciones. En el caso de las desgasificaciones se obtienen unos coeficientes de correlación medios de 0.0 para las dos correlaciones. La desviación estándar indica que el 68 % de correlaciones entre el gradiente de temperatura y la concentración de se encuentran entre -0.4 y 0.4 y para las correlaciones

entre el gradiente y la concentración de CO_2 entre -0.5 y 0.5. Esto indica que el gradiente de temperatura no estaría correlacionado con las concentraciones de gases debido a la gran dispersión de coeficientes obtenidos, además que dentro de la dispersión se encuentran tanto coeficientes positivos como negativos. A todo esto hay que sumarle que no todas las correlaciones se pueden considerar significativas debido al gran p-valor que tienen. Para la el radón hay 8 correlaciones no significativas y para el CO_2 hay 2.

En el caso de la recarga y los eventos completos, se obtienen unos coeficientes medios negativos y con una desviación estándar menor. En estos casos la media es de -0.2 y el 68 % de los coeficientes se encuentran entre -0.5 y 0.1. En la recarga, para el radón hay 12 correlaciones que no son significativas y 5 para el CO_2 . Y en los eventos completos hay 10 para el radón y 4 para el CO_2 . Estos resultados tampoco determinan que haya una correlación buena entre las concentraciones y el gradiente de temperatura ya que a pesar de que los coeficientes de correlación son menos dispersos y están centrados en un valor negativo, sigue habiendo correlaciones positivas y negativas y varias no significativas.

En el caso de las correlaciones entre la densidad y las concentraciones de los gases mostrados en las tablas 3, 5 y 7 se puede observar que los valores de los coeficientes son prácticamente iguales y de signo contrario a los coeficientes obtenidos entre el gradiente de temperatura y las concentraciones. Esto indica que el gradiente de densidad tiene una correlación casi perfecta con la temperatura.

Por otro lado, los coeficientes de correlación de la tabla 8 indican que la correlación entre los gases es muy alta, excepto para el evento 2, cuyo coeficiente de correlación se muestra en rojo por tener el signo contrario al que se esperaba. El hecho de que la mayoría de los coeficientes sean positivos tiene sentido porque en las desgasificaciones y recargas las masas de aire desplazan a ambos gases de forma conjunta y por tanto la concentración de ambos gases disminuye y aumenta simultáneamente.

		\bar{r}	σ
Desgasificación	$\Delta T - C_{Rn}$	0.0	0.4
	$\Delta T - C_{CO_2}$	0.0	0.5
Recarga	$\Delta T - C_{Rn}$	-0.2	0.3
	$\Delta T - C_{CO_2}$	-0.2	0.3
Completo	$\Delta T - C_{Rn}$	-0.2	0.3
	$\Delta T - C_{CO_2}$	-0.2	0.3

Tabla 9: Valor medio \bar{r} y desviación estándar σ de todos los coeficientes de correlación entre el gradiente de temperatura y las concentraciones de los gases, en las desgasificaciones, recargas y desgasificaciones más recargas

Ajuste de desfases temporales

Se ha representado el gradiente de temperatura y las concentraciones de CO_2 y radón en gráficas individuales cada evento. La gráfica de radón presenta más ruido que las demás. Para evitar los bordes ruidosos y poder ver de forma más clara el comportamiento de la gráfica se ha aplicado un filtro de media móvil centrado en cada hueco del vector del radón. Con una media de 3 tres puntos ya se puede observar bien el comportamiento de la gráfica.

Se ha observado que la desgasificación del CO_2 se produce primero y en consecuencia llega a su mínimo antes que el radón en todos los eventos. Este hecho se puede ver en la Figura 15. En esta gráfica el radón se representa sin el filtro porque el comportamiento se ve de forma clara en la desgasificación y recarga. Se observa cómo la disminución del CO_2 comienza antes que la del radón y también llega antes al mínimo. El CO_2 comienza la desgasificación el día 30/04/15 a las 13:15 y el radón el día 30/04/15 a las 15:00. Los mínimos ocurren el 3/05/15 a las 18:45 para el CO_2 y el 4/05/15 a las 4:00. Este desfase temporal entre concentraciones ocurre con todos los eventos en mayor o menor medida y se ha definido para cada uno.

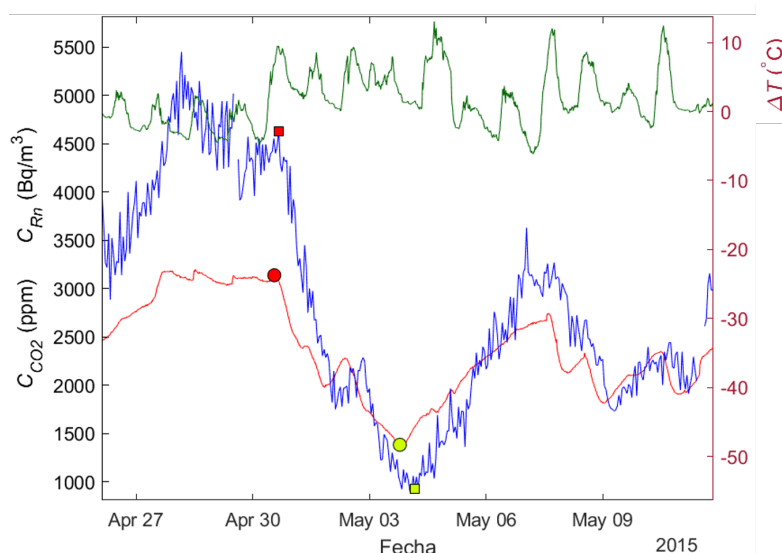


Figura 15: Evento 3 de degasificación en la Sala de Polícromos. Se muestra la concentración de radón (azul), la de CO_2 (rojo) y el gradiente de temperatura entre el exterior y la Sala de Polícromos (verde). Los marcadores cuadrados muestran el inicio y fin de la degasificación del radón cuyas fechas se indican en la tabla 1. Los marcadores circulares muestra lo mismo para el CO_2 , pero en diferentes fechas.

La determinación del desfase temporal es complicada. Esto se debe a que, a pesar de que las gráficas de ambas concentraciones presenten generalmente la misma tendencia, los mínimos y máximos relativos no coinciden de forma exacta cuando se desfasa una curva respecto a la otra. Entonces, el criterio utilizado para determinar el desfase es el de la coincidencia temporal de los mínimos absolutos. Para ello, se han representado las curvas de ambas concentraciones en la misma gráfica y se ha ido desplazando la gráfica de la concentración de CO_2 hacia la derecha hasta observar la coincidencia del mínimo absoluto. La medidas de la concentración de CO_2 se han realizado cada 15 minutos, pero un desplazamiento de 15 minutos de la gráfica del CO_2 respecto a la del radón apenas se nota visualmente. Por ello se ha ido desfasando cada más tiempo, en concreto cada hora, es decir, 4 huecos del vector del CO_2 . En la Figura 16 se puede observar que la gráfica del CO_2 se ha desfasado y por lo tanto, sus mínimos absolutos marcados en amarillo coinciden temporalmente. En la tabla 10 se muestran los desfases aplicados en las gráfica del CO_2 de cada evento. La media de todos los desfases es de 5h 17'.

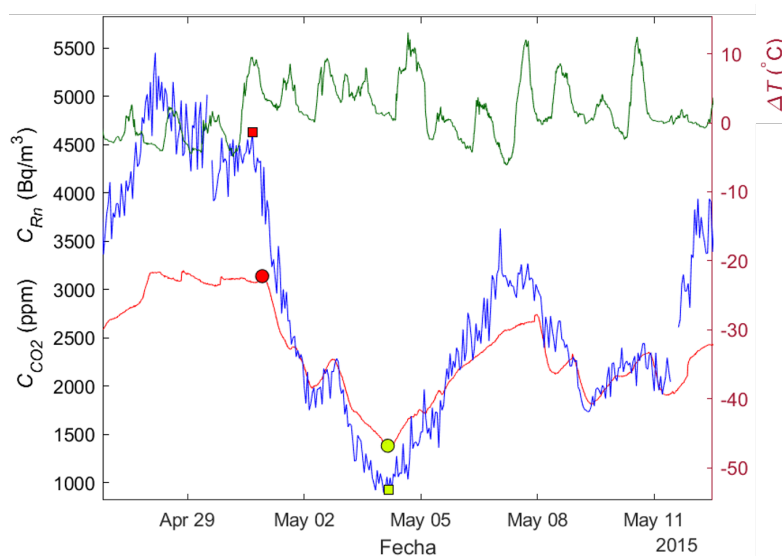


Figura 16: Evento 3 de degasificación en la Sala de Polícromos con el desfase temporal aplicado a la gráfica del CO_2 . Se muestra la concentración de radón (azul), la de CO_2 (rojo) y el gradiente de temperatura (verde). Los marcadores cuadrados muestran el inicio y fin de la degasificación del evento cuyas fechas se indican en la tabla 1. Los marcadores circulares muestran lo mismo para el CO_2 en diferentes fechas.

i	Huecos	Tiempo/h
1	24	6
2	44	11
3	36	9
4	28	7
5	36	9
6	36	9
7	28	7
8	28	7
9	28	7
10	28	7
11	20	5
12	40	10
13	24	6
14	24	6
15	28	7
16	24	6
17	32	7
18	20	5
19	24	6
20	20	5
21	20	5
22	16	4
23	16	4
24	8	2
25	8	2
26	16	4
27	16	4
28	20	5
29	20	5
30	0	0
31	8	2
32	8	2
33	8	2
34	8	2
35	4	1
36	20	5
37	20	5
Media	21.19	5h 17min

Tabla 10: Desfases aplicados a la gráfica de la concentración de CO_2 respecto a la concentración de Rn . Se muestra el número de huecos desfasado en el vector del CO_2 y las horas que corresponden ese número de huecos.

El desfase entre las desgasificaciones de Rn y CO_2 no tiene sentido físicamente debido a que domina el transporte convectivo de las masas de aire y por lo tanto, la concentración de ambos gases tiene que aumentar y disminuir al mismo tiempo. Esto quiere decir que las masas de aire se mueven debido a las condiciones de temperatura y presión, aunque simultáneamente también ocurra difusión en mucha menor medida. El hecho de que descargase primero el CO_2 tendría sentido si hubiese un predominio del transporte difusivo, pero se sabe que es más lento que el convectivo en nuestro caso, a pesar de no conocer con precisión el coeficiente difusivo de las rocas que rodean la cueva. Las rocas que rodean la sala

de Polícromos tienen un espesor de roca de unos 8 m que favorece el transporte convectivo al difusivo.

Por otro lado, los detectores de Rn se introducen en unas bolsas de plástico para protegerlos de la humedad. Cuando se coloca un nuevo detector, se observa que tarda unas horas en detectar la concentración real de la cueva. Esto se debe a que la bolsa actúa como un lámina retardadora de Rn, es decir, el radón tarda unas horas en tener la concentración real de la cueva cuando atraviesa la bolsa por difusión. Cuando la concentración es mayor en la cueva que en la bolsa, el radón penetra en la bolsa y cuando es menor en la cueva, el radón sale de la bolsa para igualar las concentraciones. En este caso el motor de movimiento del Rn no son los gradientes de presión y temperatura entre la bolsa y la cueva, sino la diferencia de concentraciones. El tiempo que tardan los detectores con bolsa en medir la concentración real frente a detectores sin bolsa se ha obtenido en el laboratorio que hay en la Facultad de Medicina. Este contiene un generador de radón calibrado, es decir, que se conoce la concentración exacta que se produce. Se ha detectado radón con bolsa y sin bolsa en el laboratorio y se ha determinado que el tiempo de retraso entre ambas medidas está entre 3 y 6 horas. Por esta razón se desechan las 10 primeras medidas cada vez que se coloca un nuevo detector.

El desfase temporal medio obtenido de 5h 17min queda dentro del rango entre 3 y 6 horas. Los desfases temporales entre las concentraciones que se han obtenido para cada evento no son iguales. Esto puede ser debido al uso de bolsas diferentes y anomalías como la propia ruptura de la bolsa o aberturas que puedan quedar. Para realizar las correlaciones, hay que tener en cuenta este desfase, por lo que se deben repetir.

Por otro lado, también se observa un desfase entre las concentraciones de los gases y el gradiente de temperatura. En la figura 15 se puede ver cómo el aumento del gradiente, y más concretamente cuando empieza a ser positivo, no produce instantáneamente el inicio de la desgasificación del CO₂. Esto tiene sentido porque el cambio de gradiente no puede provocar un movimiento instantáneo de las masas de aire y, en consecuencia, un cambio instantáneo en las concentraciones de los gases. Entonces, para confirmar la existencia este desfase temporal, se han realizado de nuevo las correlaciones corrigiendo tanto el desfase entre las concentraciones, como aplicando unos desfases con el gradiente de temperatura.

Se han repetido las correlaciones con los desfases temporales corregidos. En primer lugar, se ha corregido el desfase entre las concentraciones de los gases. Se había obtenido un desfase temporal de 5h 17min y, para poder implementarlo, se ha modificado por 5h 15min porque las medidas de CO₂ se realizan cada 15 minutos. Este desfase se ha aplicado a todas las correlaciones que se han llevado a cabo en este apartado. En segundo lugar, se han aplicado unos desfases temporales entre el gradiente y las concentraciones, desde 45 minutos hasta 13h 45min. El motivo por el que se aplican distintos desfases a la hora de realizar las correlaciones es que el mejor resultado obtenido es un indicador del desfase real con el gradiente. La media de los coeficientes de correlación calculados con cada desfase temporal se muestran en la tabla 11 y las desviaciones estándar en la tabla 12. Se puede observar cómo comienzan a mejorar las medias de los coeficientes y las desviaciones estándar conforme el desfase temporal se hace mayor y llega un punto en el que comienzan a empeorar. Los mejores resultados se obtienen para un desfase temporal de 9h 45min. Estos valores se han resaltado en color verde.

Para este desfase de 9h 45min se muestran los coeficientes de correlación entre el gradiente de temperatura y las concentraciones de cada evento en las tablas 13, 15 y 17. En las tablas 14, 16 y 18 se muestra lo mismo para el gradiente de densidad y las concentraciones. En la tabla 19 se recogen los resultados de las correlaciones entre las concentraciones. En rojo se muestran los p-valores mayores a 0.05.

	\bar{r} Desgasificación		\bar{r} Recarga		\bar{r} Completo	
Desfase	$\Delta T - C_{Rn}$	$\Delta T - C_{CO2}$	$\Delta T - C_{Rn}$	$\Delta T - C_{CO2}$	$\Delta T - C_{Rn}$	$\Delta T - C_{CO2}$
45min	-0.19	-0.13	-0.34	-0.31	-0.25	-0.20
1h 45min	-0.21	-0.14	-0.36	-0.34	-0.28	-0.23
2h 45min	-0.27	-0.21	-0.35	-0.34	-0.31	-0.27
3h 45min	-0.32	-0.28	-0.42	-0.41	-0.34	-0.31
4h 45min	-0.37	-0.34	-0.45	-0.45	-0.37	-0.36
5h 45min	-0.41	-0.40	-0.47	-0.48	-0.41	-0.40
6h 45min	-0.45	-0.46	-0.49	-0.51	-0.43	-0.43
7h 45min	-0.48	-0.51	-0.51	-0.53	-0.46	-0.46
8h 45min	-0.51	-0.54	-0.52	-0.54	-0.50	-0.53
9h 45min	-0.53	-0.55	-0.54	-0.57	-0.50	-0.51
10h 45min	-0.52	-0.55	-0.54	-0.57	-0.50	-0.51
11h 45min	-0.52	-0.54	-0.54	-0.57	-0.50	-0.51
12h 45min	-0.51	-0.52	-0.54	-0.57	-0.50	-0.51
13h 45min	-0.49	-0.50	-0.55	-0.57	-0.50	-0.50
14h 45min	-0.47	-0.46	-0.55	-0.56	-0.49	-0.49

Tabla 11: Medias de los coeficientes de correlación entre ΔT y las concentraciones de los gases de todos los eventos en las desgasificaciones, recargas y eventos completos con los desfases temporales con el gradiente corregidos que se indican a la izquierda. El desfase entre concentraciones de 5h 15min se ha corregido también.

	$\bar{\sigma}$ Desgasificación		$\bar{\sigma}$ Recarga		$\bar{\sigma}$ Completo	
Desfase	$\Delta T - C_{Rn}$	$\Delta T - C_{CO2}$	$\Delta T - C_{Rn}$	$\Delta T - C_{CO2}$	$\Delta T - C_{Rn}$	$\Delta T - C_{CO2}$
45min	0.37	0.34	0.26	0.27	0.27	0.24
1h 45min	0.40	0.39	0.25	0.26	0.27	0.24
2h 45min	0.36	0.35	0.32	0.31	0.26	0.24
3h 45min	0.35	0.33	0.24	0.24	0.25	0.23
4h 45min	0.34	0.33	0.23	0.23	0.23	0.22
5h 45min	0.29	0.30	0.21	0.22	0.21	0.20
6h 45min	0.26	0.26	0.20	0.21	0.19	0.19
7h 45min	0.20	0.21	0.20	0.20	0.17	0.18
8h 45min	0.16	0.19	0.19	0.20	0.16	0.19
9h 45min	0.16	0.19	0.19	0.20	0.14	0.17
10h 45min	0.16	0.17	0.20	0.20	0.14	0.16
11h 45min	0.16	0.16	0.22	0.22	0.13	0.16
12h 45min	0.16	0.16	0.23	0.24	0.13	0.16
13h 45min	0.17	0.17	0.24	0.26	0.14	0.16
14h 45min	0.18	0.18	0.25	0.28	0.14	0.16

Tabla 12: Valores medios de las desviaciones estándar de los coeficientes de correlación medios mostrados en la tabla 11.

i	ΔT y C_{Rn}			ΔT y C_{CO_2}		
	N	r	$p - v$	N	r	$p - v$
1	119	-0.79	0	477	-0.87	0
2	9	-0.81	0.01	33	-0.91	0
3	85	-0.49	0	337	-0.52	0
4	57	-0.44	0	225	-0.60	0
5	43	-0.63	0	169	-0.66	0
6	55	-0.45	0	217	-0.53	0
7	46	-0.44	0	182	-0.34	0
8						
9						
10	119	-0.51	0	473	-0.56	0
11	93	-0.39	0	369	-0.47	0
12	109	-0.20	0.03	411	-0.19	0
13	142	-0.61	0	565	-0.54	0
14	101	-0.54	0	401	-0.58	0
15	72	-0.30	0.01	249	-0.12	0.06
16	76	-0.38	0	301	-0.44	0
17	110	-0.81	0	437	-0.87	0
18	84	-0.26	0.02	333	-0.45	0
19	57	-0.40	0	245	-0.47	0
20	253	-0.73	0	1025	-0.74	0
21	76	-0.59	0	301	-0.61	0
22	75	-0.71	0	297	-0.73	0
23	17	-0.79	0	65	-0.92	0
24	55	-0.50	0	217	-0.52	0
25	55	-0.31	0.02	217	-0.51	0
26	32	-0.40	0.02	145	-0.38	0
27	103	-0.58	0	433	-0.59	0
28	152	-0.51	0	605	-0.46	0
29	188	-0.53	0	765	-0.55	0
30	165	-0.58	0	905	-0.56	0
31	39	-0.69	0	153	-0.78	0
32	38	-0.47	0	149	-0.37	0
33	90	-0.48	0	357	-0.31	0
34	168	-0.50	0	689	-0.49	0
35	114	-0.54	0	453	-0.62	0
36	153	-0.56	0	609	-0.64	0
37	93	-0.47	0	389	-0.52	0

Tabla 13: Datos obtenidos al realizar la correlación de la desgasificación entre ΔT y C_{Rn} y entre ΔT y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos con los desfases temporales corregidos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el $p - valor$. Los $p - valores$ menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

i	$\Delta \rho$ y C_{Rn}			$\Delta \rho$ y C_{CO_2}		
	N	r	$p - v$	N	r	$p - v$
1	119	0.79	0	477	0.86	0
2	9	0.81	0.008	33	0.92	0
3	85	0.48	0	337	0.50	0
4	57	0.43	0.0008	225	0.59	0
5	43	0.62	0	169	0.65	0
6	55	0.45	0.0007	217	0.53	0
7	46	0.43	0.003	182	0.34	0
8						
9						
10						
11	93	0.38	0.0002	369	0.47	0
12	109	0.21	0.03	411	0.20	0
13	142	0.60	0	565	0.53	0
14	101	0.53	0	401	0.57	0
15	72	0.30	0.01	249	0.12	0.06
16	76	0.37	0.0011	301	0.42	0
17	110	0.81	0	437	0.86	0
18	84	0.26	0.017	333	0.45	0
19	57	0.40	0.0019	245	0.47	0
20	253	0.72	0	1023	0.72	0
21	76	0.57	0	301	0.59	0
22	70	0.69	0	277	0.71	0
23	17	0.78	0.0002	65	0.92	0
24	55	0.49	0.0002	217	0.51	0
25	55	0.30	0.03	217	0.50	0
26	31	0.36	0.04	141	0.35	0
27	103	0.55	0	433	0.56	0
28	152	0.45	0	605	0.40	0
29	188	0.50	0	765	0.52	0
30	165	0.55	0	905	0.54	0
31	39	0.69	0	153	0.77	0
32	38	0.47	0.0031	149	0.37	0
33	90	0.48	0	357	0.31	0
34	168	0.46	0	689	0.45	0
35	114	0.51	0	453	0.59	0
36	153	0.55	0	609	0.64	0
37	93	0.44	0	389	0.48	0

Tabla 14: Datos obtenidos al realizar la correlación de la desgasificación entre $\Delta \rho$ y C_{Rn} y entre $\Delta \rho$ y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos con los desfases temporales corregidos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el $p - valor$. Los $p - valores$ menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

i	ΔT y C_{Rn}			ΔT y C_{CO_2}		
	N	r	$p - v$	N	r	$p - v$
1	108	-0.65	0	429	-0.73	0
2	45	-0.52	0	177	-0.58	0
3	94	-0.60	0	373	-0.60	0
4	64	-0.35	0	253	-0.44	0
5	96	-0.36	0	381	-0.15	0
6	99	-0.68	0	405	-0.72	0
7						
8						
9						
10	91	-0.45	0	361	-0.67	0
11	89	-0.68	0	357	-0.68	0
12	33	-0.66	0	129	-0.69	0
13	129	-0.53	0	529	-0.53	0
14	43	-0.28	0.07	169	-0.34	0
15	98	-0.67	0	391	-0.64	0
16	66	-0.74	0	281	-0.80	0
17	69	-0.79	0	289	-0.81	0
18	94	-0.49	0	373	-0.57	0
19	168	-0.44	0	669	-0.58	0
20	218	-0.73	0	833	-0.79	0
21	59	-0.50	0	233	-0.56	0
22	100	-0.21	0.04	397	-0.11	0.03
23	25	-0.78	0	97	-0.74	0
24	32	-0.31	0.09	125	-0.29	0
25	85	-0.61	0	337	-0.56	0
26	37	-0.55	0	145	-0.62	0
27	87	-0.45	0	345	-0.50	0
28	46	-0.18	0.24	181	-0.38	0
29	526	-0.42	0	2121	-0.44	0
30	199	-0.77	0	793	-0.78	0
31	45	-0.83	0	177	-0.82	0
32	88	-0.73	0	349	-0.72	0
33	92	-0.14	0.19	365	-0.25	0
34	54	-0.42	0	213	-0.41	0
35	142	-0.48	0	585	-0.64	0
36	92	-0.24	0.02	381	-0.28	0
37	196	-0.69	0	781	-0.73	0

Tabla 15: Datos obtenidos al realizar la correlación de la recarga entre ΔT y C_{Rn} y entre ΔT y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos con los desfases temporales corregidos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el $p - valor$. Los $p - valores$ menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

i	$\Delta \rho$ y C_{Rn}			$\Delta \rho$ y C_{CO_2}		
	N	r	$p - v$	N	r	$p - v$
1	108	0.64	0	429	0.72	0
2	45	0.51	0.0004	177	0.57	0
3	94	0.59	0	373	0.60	0
4	64	0.34	0.006	253	0.42	0
5	96	0.35	0.0005	381	0.15	0.004
6	99	0.67	0	405	0.71	0
7						
8						
9						
10						
11	89	0.68	0	357	0.67	0
12	33	0.67	0	129	0.70	0
13	129	0.49	0	524	0.48	0
14	43	0.27	0.08	169	0.33	0
15	93	0.68	0	371	0.64	0
16	66	0.73	0	281	0.79	0
17	69	0.78	0	289	0.81	0
18	94	0.46	0	373	0.55	0
19	168	0.42	0	669	0.55	0
20	217	0.71	0	828	0.78	0
21	59	0.47	0.0002	233	0.52	0.07
22	100	0.20	0.05	395	0.09	0
23	25	0.77	0	97	0.73	0.0009
24	32	0.30	0.09	125	0.29	0
25	83	0.58	0	332	0.52	0
26	37	0.54	0.0006	145	0.61	0
27	87	0.43	0	345	0.48	0
28	46	0.17	0.2	181	0.38	0
29	526	0.41	0	2121	0.43	0
30	198	0.75	0	789	0.76	0
31	45	0.83	0	177	0.83	0
32	88	0.72	0	349	0.70	0
33	92	0.11	0.3	365	0.23	0
34	54	0.39	0.004	213	0.39	0
35	142	0.48	0	585	0.64	0
36	92	0.25	0.018	381	0.28	0
37	196	0.67	0	781	0.71	0

Tabla 16: Datos obtenidos al realizar la correlación de la recarga entre $\Delta \rho$ y C_{Rn} y entre $\Delta \rho$ y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos con los desfases temporales corregidos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el $p - valor$. Los $p - valores$ menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

i	ΔT y C_{Rn}			ΔT y C_{CO_2}		
	N	r	$p - v$	N	r	$p - v$
1	226	-0.66	0	905	-0.73	0
2	53	-0.51	0	209	-0.70	0
3	178	-0.51	0	709	-0.54	0
4	120	-0.41	0	477	-0.51	0
5	138	-0.32	0	549	-0.32	0
6	153	-0.66	0	621	-0.68	0
7	46	-0.44	0	182	-0.34	0
8						
9						
10	209	-0.37	0	833	-0.38	0
11	181	-0.64	0	725	-0.62	0
12	141	-0.14	0.09	539	-0.15	0
13	270	-0.51	0	1093	-0.51	0
14	143	-0.50	0	569	-0.50	0
15	170	-0.40	0	640	-0.20	0
16	141	-0.53	0	581	-0.53	0
17	178	-0.54	0	725	-0.62	0
18	177	-0.43	0	705	-0.55	0
19	224	-0.49	0	913	-0.63	0
20	470	-0.72	0	1857	-0.74	0
21	134	-0.53	0	533	-0.58	0
22	174	-0.36	0	693	-0.38	0
23	41	-0.66	0	161	-0.72	0
24	86	-0.44	0	341	-0.40	0
25	139	-0.40	0	553	-0.51	0
26	68	-0.41	0	289	-0.37	0
27	189	-0.40	0	777	-0.30	0
28	197	-0.44	0	785	-0.38	0
29	713	-0.34	0	2885	-0.45	0
30	363	-0.69	0	1697	-0.60	0
31	83	-0.72	0	329	-0.78	0
32	125	-0.63	0	497	-0.50	0
33	181	-0.19	0.01	721	-0.11	0
34	221	-0.46	0	901	-0.42	0
35	255	-0.48	0	1037	-0.44	0
36	244	-0.42	0	989	-0.47	0
37	288	-0.63	0	1169	-0.66	0

Tabla 17: Datos obtenidos al realizar la correlación de la desgasificación más la recarga entre ΔT y C_{Rn} y entre ΔT y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos con los desfases temporales corregidos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el $p - valor$. Los $p - valores$ menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

i	$\Delta \rho$ y C_{Rn}			$\Delta \rho$ y C_{CO_2}		
	N	r	$p - v$	N	r	$p - v$
1	226	0.65	0	905	0.72	0
2	53	0.51	0.0001	209	0.69	0
3	178	0.50	0	709	0.53	0
4	120	0.40	0	477	0.50	0
5	138	0.31	0.0002	549	0.31	0
6	153	0.66	0	621	0.67	0
7	46	0.43	0.003	182	0.34	0
8						
9						
10						
11	181	0.64	0	725	0.62	0
12	141	0.15	0.08	539	0.16	0.0003
13	270	0.51	0	1088	0.48	0
14	143	0.49	0	569	0.50	0
15	165	0.40	0	620	0.19	0
16	141	0.52	0	581	0.52	0
17	178	0.52	0	725	0.61	0
18	177	0.41	0	705	0.54	0
19	224	0.48	0	913	0.62	0
20	469	0.70	0	1850	0.73	0
21	134	0.51	0	533	0.56	0
22	169	0.33	0	671	0.35	0
23	41	0.65	0	161	0.72	0
24	86	0.43	0	341	0.39	0
25	137	0.38	0	548	0.49	0
26	67	0.37	0.002	285	0.33	0
27	189	0.35	0	777	0.25	0
28	197	0.37	0	785	0.31	0
29	713	0.32	0	2885	0.43	0
30	362	0.67	0	1693	0.58	0
31	83	0.72	0	329	0.78	0
32	125	0.62	0	497	0.49	0
33	181	0.18	0.017	721	0.10	0.006
34	221	0.41	0	901	0.36	0
35	255	0.44	0	1037	0.40	0
36	244	0.42	0	989	0.47	0
37	288	0.61	0	1169	0.64	0

Tabla 18: Datos obtenidos al realizar la correlación de la desgasificación más la recarga entre $\Delta \rho$ y C_{Rn} y entre $\Delta \rho$ y C_{CO_2} para cada uno de los 37 eventos con los desfases temporales corregidos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer la correlación N , el coeficiente de correlación r y el $p - valor$. Los $p - valores$ menores que 0.0001 se han aproximado a 0.

C_{Rn} y C_{CO_2}						
	Descarga		Recarga		Completo	
i	N	r	N	r	N	r
1	119	0.95	108	0.96	226	0.95
2	9	0.79	45	0.93	53	0.84
3	85	0.97	94	0.97	178	0.97
4	57	0.89	64	0.82	120	0.85
5	43	0.81	96	0.74	138	0.74
6	55	0.97	99	0.98	153	0.97
7	47	0.97	97	0.81	143	0.65
8	41	0.96	46	0.92	86	0.92
9	110	0.95	105	0.88	214	0.85
10	119	0.98	91	0.88	209	0.98
11	93	0.98	89	0.96	181	0.95
12	109	0.80	33	0.90	141	0.83
13	142	0.89	129	0.95	270	0.81
14	101	0.96	43	0.94	143	0.95
15	67	0.75	104	0.95	170	0.88
16	76	0.98	66	0.98	141	0.97
17	110	0.96	69	0.95	178	0.96
18	84	0.83	94	0.96	177	0.93
19	57	0.95	168	0.85	224	0.86
20	253	0.97	208	0.95	460	0.95
21	86	0.97	59	0.93	144	0.93
22	75	0.95	100	0.92	174	0.9
23	17	0.89	25	0.96	41	0.92
24	55	0.96	32	0.93	86	0.94
25	55	0.94	85	0.97	139	0.92
26	32	0.98	37	0.94	68	0.96
27	103	0.98	87	0.99	189	0.93
28	152	0.99	46	0.94	197	0.98
29	188	0.98	526	0.94	713	0.9
30	165	0.95	199	0.97	363	0.93
31	39	0.9	45	0.93	83	0.81
32	38	0.95	88	0.95	125	0.91
33	90	0.79	92	0.92	181	0.86
34	168	0.97	54	0.99	221	0.97
35	114	0.98	142	0.83	255	0.93
36	153	0.91	92	0.93	244	0.92
37	93	0.98	196	0.98	288	0.98

Tabla 19: Datos obtenidos al realizar la correlación entre C_{Rn} y C_{CO_2} para las tres fases de cada evento con los desfases temporales corregidos. Se muestra el número de pares de valores utilizados para hacer las correlaciones N y los coeficientes de correlación r . Los p-valores son 0 en todas las correlaciones.

En la tabla 20 se muestran los coeficientes de correlación medios entre el gradiente de temperatura y las concentraciones y sus desviaciones estándar necesarias para analizar las correlaciones con los desfases temporales aplicados. En el caso de las desgasificaciones se obtiene un coeficiente de correlación medio de -0.53 entre el gradiente y el radón. Y entre el gradiente y el CO_2 se obtienen unos coeficientes medios de -0.55. Las desviaciones estándar indican que el 68 %

de coeficientes se encuentran entre -0.69 y -0.37 para el radón y entre -0.74 y -0.36 para el CO_2 . Esto indica que la gran dispersión de las correlaciones es relativamente pequeña y además, las medias de las correlaciones son negativas. Asimismo no se encuentra ningún coeficiente positivo. Para el radón hay 0 correlaciones que no son significativas y 1 para el CO_2 .

En la recarga se obtiene lo mismo para la correlación entre el gradiente y el radón. En el caso de la correlación entre el gradiente y el CO_2 el coeficiente es -0.56 y la desviación estándar es 0.19, es decir, el 68 % de los valores quedan entre -0.75 y -0.19. Este resultado es similar al que se obtiene en la desgasificación y además, no se encuentra ningún coeficiente de correlación positivo. Para el radón hay 4 correlaciones que no son significativas y 0 para el CO_2 .

Para los eventos completos los resultados son parecidos. Los coeficientes de correlación medios son -0.49 para el gradiente y el radón y -0.50 para el gradiente y el CO_2 . El 68 % de los coeficientes se encuentran entre -0.63 y -0.35 para el radón y entre -0.67 y -0.33 para el CO_2 . Para el radón hay 1 correlación que no es significativa y 0 para el CO_2 .

Al igual que sin aplicar los desfase temporales, en el caso de las correlaciones entre la densidad y las concentraciones de los gases se puede observar que los valores de los coeficientes son prácticamente iguales y de signo contrario a los coeficientes obtenidos entre el gradiente de temperatura y las concentraciones. Esto indica que el gradiente de densidad tiene una correlación casi perfecta con la temperatura.

Por otro lado, los coeficientes de correlación de la tabla 19 indican que la correlación entre los gases es muy alta. Este hecho tiene sentido porque en las desgasificaciones y recargas las masas de aire desplazan a ambos gases de forma conjunta y por tanto la concentración de ambos gases disminuye y aumenta simultáneamente. Esto mismo sucede sin tener en cuenta los desfases.

		\bar{r}	σ
Desgasificación	$\Delta T - C_{Rn}$	-0.53	0.16
	$\Delta T - C_{CO_2}$	-0.55	0.19
Recarga	$\Delta T - C_{Rn}$	-0.53	0.19
	$\Delta T - C_{CO_2}$	-0.56	0.19
Completo	$\Delta T - C_{Rn}$	-0.49	0.14
	$\Delta T - C_{CO_2}$	-0.50	0.17

Tabla 20: Valor medio \bar{r} y desviación estándar σ de todos los coeficientes de correlación entre el gradiente de temperatura y las concentraciones de los gases en las desgasificaciones, recargas y desgasificaciones más recargas cuando se han aplicado los desfase temporales.

Comparación de correlaciones

En la tabla 21 se observan las diferencias entre los coeficientes de correlación calculados teniendo en cuenta los desfases temporales y los coeficientes sin desfases de cada evento. Todos valores de esa tabla son negativos, lo cual quiere decir que los nuevos coeficientes de correlación son menores que los anteriores y por lo tanto han mejorado. Además todos los coeficientes de correlación calculados con el desfase son negativos como se puede ver en las tablas 13, 15 y 17.

En las tablas 22, 23 y 24 se muestran las medias de los coeficientes de correlación entre el gradiente de temperatura y las concentraciones de los gases, la desviación estándar de los coeficientes y el número de correlaciones no significativas sin aplicar los desfases y aplicándolos. También se muestran las diferencias que indican cómo mejoran sustancialmente estos tres parámetros con la aplicación de los desfase temporales. Las dispersiones de los coeficientes de correlación se hacen menores y disminuye el número de eventos no significativos.

En la tabla 25 se muestran los coeficientes de correlación medios para las concentraciones de los gases. Se puede ver cómo mejoran al aplicar los desfases. En la tabla 26 se muestran las desviaciones estándar de estas correlaciones y también se hacen menores, indicando que la dispersión de coeficientes disminuye al corregir los desfases. La mejora de estos coeficientes es una muestra de la existencia del desfase temporal que hay entre las concentraciones y con el gradiente de temperatura.

i	Desgasificación		Recarga		Desgasificación y recarga	
	ΔT y C_{Rn}	ΔT y C_{CO_2}	ΔT y Rn	ΔT y C_{CO_2}	ΔT y C_{Rn}	ΔT y C_{CO_2}
1	-0.17	-0.27	-0.17	-0.42	-0.23	-0.28
2	-1.73	0	0.05	-0.14	-0.01	-0.27
3	-0.82	-0.81	-0.27	-0.21	-0.43	-0.34
4	-0.29	-0.61	0.02	-0.24	-0.09	-0.32
5	-0.95	-1.11	-0.36	-0.35	-0.41	-0.25
6	-1.08	-1.25	-0.27	-0.33	-0.26	-0.26
7	-1	-0.99			-1	-0.99
8						
9						
10	-0.08	-0.211	-0.32	-0.67	-0.27	-0.29
11	-0.76	-0.94	-0.63	-0.48	-0.45	-0.4
12	-0.56	-0.33	-0.47	-0.76	-0.54	-0.3
13	-0.24	-0.23	-0.25	-0.38	-0.29	-0.2
14	-0.38	-0.31	-0.64	-0.81	-0.43	-0.33
15	-0.28	-0.28	0.12	0.02	-0.12	-0.13
16	-0.14	-0.23	-0.33	-0.42	-0.25	-0.23
17	-0.39	-0.43	-0.54	-0.59	-0.49	-0.44
18	-0.54	-0.98	-0.23	-0.3	-0.28	-0.36
19	-0.91	-1.15	-0.29	-0.36	-0.29	-0.19
20	-0.23	-0.22	-0.07	-0.04	-0.14	-0.1
21	-0.42	-0.39	-0.4	-0.45	-0.36	-0.36
22	-0.36	-0.33	-0.25	-0.1	-0.25	-0.21
23	-1.68	-1.86	-0.01	0.13	-0.24	-0.06
24	-0.29	-0.27	-0.47	-0.68	-0.42	-0.39
25	-0.34	-0.63	-0.49	-0.44	-0.33	-0.31
26	-0.75	-0.83	-0.81	-0.94	-0.86	-0.88
27	-0.26	-0.28	0.01	-0.03	-0.29	-0.3
28	-0.22	-0.18	-0.85	-0.91	-0.25	-0.18
29	-0.25	-0.29	-0.12	-0.2	-0.15	-0.2
30	-0.09	-0.23	-0.04	-0.05	-0.08	-0.12
31	-0.41	-0.3	-0.42	-0.36	-0.47	-0.48
32	-1.16	-1.06	-0.4	-0.45	-0.47	-0.4
33	-0.91	-0.87	0.19	0	-0.4	-0.27
34	-0.06	-0.08	-0.45	-0.51	-0.17	-0.17
35	-0.13	-0.19	-0.06	-0.38	-0.22	-0.27
36	-0.33	-0.38	-0.3	-0.42	-0.36	-0.4
37	-0.71	-0.72	-0.19	-0.17	-0.25	-0.19

Tabla 21: Diferencias entre los coeficientes de correlación entre el gradiente de temperatura y las concentraciones de los gases con el desfase temporal corregido y sin corregir para cada evento en la desgasificación, en la recarga y en ambas.

		\bar{r} sin desfase	\bar{r} con desfase	Diferencia
Desgasificación	ΔT y C_{Rn}	0.03	-0.53	0.56
	ΔT y C_{CO_2}	0.005	-0.55	0.56
Recarga	ΔT y C_{Rn}	-0.25	-0.54	0.29
	ΔT y C_{CO_2}	-0.20	-0.57	0.37
Desgasificación y recarga	ΔT y C_{Rn}	-0.16	-0.50	0.34
	ΔT y C_{CO_2}	-0.19	-0.51	0.32

Tabla 22: Media de los coeficientes de correlación \bar{r} entre el gradiente de temperatura y las concentraciones de los gases sin los desfases y con los desfases aplicados, junto con el valor absoluto de la diferencia entre ambos.

		σ sin desfase	σ con desfase	Diferencia
Desgasificación	ΔT y C_{Rn}	0.4	0.16	0.24
	ΔT y C_{CO_2}	0.5	0.19	0.31
Recarga	ΔT y C_{Rn}	0.3	0.16	0.14
	ΔT y C_{CO_2}	0.3	0.19	0.11
Completo	ΔT y C_{Rn}	0.3	0.14	0.16
	ΔT y C_{CO_2}	0.3	0.17	0.13

Tabla 23: Desviación estándar de los coeficientes de correlación entre el gradiente de temperatura y las concentraciones de los gases sin los desfases y con los desfases aplicados, junto con el valor absoluto de la diferencia entre ambos.

		N sin desfases	N con desfases	Diferencia
Desgasificación	ΔT y C_{Rn}	8	0	8
	ΔT y C_{CO_2}	2	1	1
Recarga	ΔT y C_{Rn}	12	4	8
	ΔT y C_{CO_2}	5	0	5
Completo	ΔT y C_{Rn}	10	1	9
	ΔT y C_{CO_2}	4	0	4

Tabla 24: Número de eventos no significativos N sin los desfases y con los desfases aplicados para las correlaciones entre el gradiente de temperatura y las concentraciones de los gases, junto con el valor absoluto de la diferencia entre ambos.

		\bar{r} sin desfase	\bar{r} con desfase	Diferencia
Desgasificación	C_{CO_2} y C_{Rn}	0.87	0.93	0.06
Recarga	C_{CO_2} y C_{CO_2}	0.91	0.93	0.02
Desgasificación y recarga	C_{CO_2} y C_{Rn}	0.89	0.90	0.01

Tabla 25: Media de los coeficientes de correlación \bar{r} entre C_{Rn} y C_{CO_2} sin los desfases y con los desfases aplicados, junto con el valor absoluto de la diferencia entre ambos.

		σ sin desfase	σ con desfase	Diferencia
Desgasificación	C_{CO_2} y C_{Rn}	0.31	0.07	0.24
Recarga	C_{CO_2} y C_{Rn}	0.08	0.05	0.03
Completo	C_{CO_2} y C_{CO_2}	0.11	0.07	0.04

Tabla 26: Desviación estándar de los coeficientes de correlación entre C_{Rn} y C_{CO_2} sin los desfases y con los desfases aplicados, junto con el valor absoluto de la diferencia entre ambos.

5. Conclusiones

La Sala de Polícromos presenta intercambios gaseosos de periodo de tiempo corto más frecuentemente en las épocas del año en las que ocurren los mayores contrastes térmicos entre el día y la noche. Una de estas épocas es la primavera, cuando aumenta el gradiente de temperatura que provoca la evaporación del agua del suelo que bloquea las grietas que rodean la cueva, permitiendo el intercambio de masas de aire entre la cueva y el exterior. Y la otra época es en otoño cuando el gradiente de temperatura comienza a ser menor y se empieza a acumular agua procedente de las precipitaciones en las grietas de la cueva.

Se ha llevado a cabo un inventario de los 37 eventos de desgasificación de periodo corto. Se producen más eventos de los analizados y son más de lo que se podría esperar viendo la dinámica general de la serie temporal a lo largo de los 5 años.

Estos eventos se han estudiado con el fin de determinar si el gradiente de temperatura entre el exterior y el interior de la cueva es un factor determinante que provoca estos eventos. Para ello se han utilizado los gases traza CO_2 y radón cuya concentración indica el aislamiento o ventilación de la cueva. Se han realizado correlaciones entre las concentraciones de los gases traza y el gradiente de temperatura, además de las correlaciones entre las concentraciones y la densidad del aire y las correlaciones entre las concentraciones de los gases.

Se ha observado que hay un desfase temporal entre el gradiente de temperatura y la concentración de los gases de la cueva debido a que el cambio de gradiente que produce una desgasificación no es instantáneo. Y también un desfase temporal entre las series temporales de las concentraciones provocado por la bolsa de plástico en la que se encuentran los detectores de radón. Las correlaciones mejoran sustancialmente con los desfases corregidos.

Aunque las medias de los coeficientes de correlación puedan parecer pequeñas, en realidad los resultados no son malos. Los procesos que ocurren en la naturaleza en ocasiones son complejos como en este caso, y entran en juego muchas variables. Entonces se podría concluir que el gradiente de temperatura es un factor determinante a la hora de producirse las grandes desgasificaciones a través de las rocas de configuración kárstica.

Por último, cabe señalar que los coeficientes de correlación pueden ser afinados con un conocimiento más preciso de los desfases temporales que puede ser objeto de estudios posteriores.

Referencias

- [1] Gázquez, F., Quindós-Ponceta, L., Sainz-Fernández, C., Fernández-Villar, A., Fuente-Merino, I., y Celaya-Gonzalez, S. (2016). Spatiotemporal distribution of $\delta^{13}\text{CO}_2$ in a shallow cave and its potential use as indicator of anthropic pressure. *Journal of environmental management*, 180, 421-432. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.05.078
- [2] IPCE (2014). Programa de investigación para la conservación preventiva y régimen de acceso de la cueva de Altamira (2012-2014) Volumen II. Historia de la conservación de la cueva de Altamira (1868-2012)
- [3] IPCE (2014). Programa de investigación para la conservación preventiva y régimen de acceso de la cueva de Altamira (2012-2014) Volumen I. Informe Final.
- [4] Rábago, D. (2017). Análisis de series temporales en las temperaturas de la cueva de Altamira: influencia del ambiente exterior.
- [5] Rábago, D. (2019). Influencia del campo de temperaturas en la dinámica ambiental de la cueva de Altamira.
- [6] Sainz, C., Rábago, D., Celaya, S., Fernández, E., Quindós, J., Quindós, L., ... Quindós, L.S. (2018). Continuous monitoring of radon gas as a tool to understand air dynamics in the cave of Altamira (Cantabria, Spain). *Science Of The Total Environment*, 624, 416-423. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.146
- [7] Sánchez-Moral, S., Cuezva, S., Fernández-Cortés, A., Janices, I., Benavente, D., Cañaveras, J.C., ... Sáinz-Jiménez, C. (2014) Estudio integral del estado de conservación de la cueva de Altamira y su arte paleolítico. Perspectivas futuras de conservación. Monografías del Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira, Nº24.
- [8] Villar E. (1981) Proyecto científico-técnico elaborado para la conservación de las pinturas de la cueva de Altamira. Monografías del Centro de Investigación y Museo de Altamira, Nº5.
- [9] Villar, E., Fernández, P.L., Quindós, L.S., Solana, J.R., Soto, J., y Plaza, L. (1983). Estudios físico-químicos sobre la cueva de Altamira. Monografías del Centro de Investigación y Museo de Altamira, Nº9.
- [10] Villar, E., Bonet, A., Díaz-Caneja, B., Fernández, P.L., Gutiérrez, I, Solana, J.R., ... Soto, J. (1984). Estudios físico-químicos de la Sala de Polícromos. Influencia de la presencia humana y criterios de conservación. Monografías del Centro de Investigación y Museo de Altamira, Nº11.